

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Ščurić

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**UTJECAJ DEBLJINE STIJENKE NA MEHANIČKA
SVOJSTVA NODULARNOG LIJEVA**

Mentor:
Prof. Dr.sc. Branko Bauer

Student:
Ivan Ščurić

Zagreb, 2014.

Izjava

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, te uz pomoć stručne literature koja je navedena.

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Branku Baueru na stručnom vodstvu te pomoći pri izradi ovog rada. Zahvaljujem se ljevaonici Metalska Industrija Varaždin na uzorcima nodularnog lijeva. Zahvaljujem se svim djelatnicima Katedre i Laboratorija za ljevarstvo na ispitivanju uzoraka, savjetima, uputstvima i komentarima pri izradi ovog rada te na stručnoj pomoći i suradnji.

Ivan Ščurić

SAŽETAK

U radu je analiziran utjecaj debljine stijenke na mehanička svojstva nodularnog lijeva. Rad se sastoji od dva dijela: teorijskog i eksperimentalnog.

U teorijskom dijelu ukratko su objašnjena svojstva i primjena nodularnog lijeva. Također je prikazana i klasifikacija nodularnog lijeva, njegovo skrućivanje te utjecaj kemijskog sastava i mikrostrukture na mehanička svojstva lijeva. Osim elemenata koji utječu na svojstva i mikrostrukturu, prikazan je i utjecaj nodularnosti grafitu te broja i veličine nodula na mehanička svojstva i mikrostrukturu.

U eksperimentalnom dijelu ispitivan je utjecaj različite debljine stijenke na odljevke od nodularnog lijeva kvalitete EN GJS 400 – 15. Odlivene su Y – probe tri različite debljine i na tim ispitnim uzorcima su provedena metalografska i mehanička ispitivanja. Također je u sklopu rada ispitan i utjecaj različitog CE na mikrostrukturu i mehanička svojstva.

Na temelju dobivenih rezultata utvrđeno je da svi odljevci pripadaju nodularnom lijevu EN GJS 400 – 15 te kako debljina stijenke utječe na mehanička svojstva.

Ključne riječi: nodularni lijev, mikrostruktura, mehanička svojstva, debljina stijenke

SUMMARY

This paper analyzes the influence of wall thickness on mechanical properties of ductile iron. It is composed of two parts: theoretical and experimental.

In the theoretical part properties and application are briefly discussed. There is a overview of ductile iron classification, its solidification and the influence of chemical composition and microstructure on mechanical properties. It is also shown the influence of graphite nodularity and the number and the size of nodules on mechanical properties and microstructure.

In the experimental part influence of different wall thickness on ductile iron quality EN GJS 400 - 15 was tested. Y – probes with different wall thickness were casted and metallographic and mechanical testing were performed on this test samples. The influence of different CE on microstructure and mechanical properties was also tested.

On the basis of the obtained results it was shown that the tested castings belong to the ductile iron EN GJS 400 – 15 and that the thickness affects on mechanical properties.

Key words: ductile iron, microstructure, mechanical properties, wall thickness

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	IV
SUMMARY	V
SADRŽAJ.....	VI
POPIS SLIKA	VII
POPIS TABLICA	IX
POPIS OZNAKA.....	X
1. UVOD.....	1
2. NODULARNI LIJEV	3
2.1. Osnovne značajke nodularnog lijeva	3
2.2. Klasifikacija nodularnog lijeva.....	5
2.3. Skrućivanje nodularnog lijeva	9
2.4. Utjecaj kemijskog sastava i mikrostrukture na mehanička svojstva nodularnog lijeva	13
2.4.1. Utjecaj stalnih elemenata	13
2.4.2. Utjecaj legirajućih elemenata.....	20
2.4.3. Utjecaj pratećih elemenata	22
2.4.4. Utjecaj nodularnosti grafita	24
2.4.5. Utjecaj broja i veličine nodula	24
2.4.6. Utjecaj udjela ferita i perlita	26
2.5. Mikrostruktura nodularnog lijeva	27
3. EKSPERIMENTALNI DIO.....	34
3.1. Proizvodnja nodularnog lijeva.....	36
3.2. Ispitivanje kemijskog sastava	39
3.3 Toplinska analiza.....	41
3.4. Metalografska ispitivanja	41
3.4.1. Priprema uzoraka.....	41
3.4.2. Ispitivanje mikroskopom	44
3.5. Ispitivanje mehaničkih svojstava.....	45
3.6. Ispitivanje tvrdoće.....	46
4. REZULTATI I RASPRAVA.....	47
4.1. Kemijski sastav primarne taljevine.....	47
4.2. Kemijski sastav noduliranog i cijepljenog nodularnog lijeva	48
4.3. Rezultati toplinske analize	49
4.4. Rezultati metalografskih ispitivanja.....	50
4.5. Određivanje udjela grafita u nodularnom lijevu	54
4.6. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava	59
5. ZAKLJUČAK.....	60
6. LITERATURA	61
PRILOZI	63

POPIS SLIKA

Slika 1. Mikrostruktura feritno-perlitnog nodularnog lijeva, povećanje 100x	3
Slika 2. a) u svijetu u 2005. godini, b) u Hrvatskoj u 2006. godini	4
Slika 3. Primjeri odljevaka nodularnog lijeva	5
Slika 4. Klasifikacija oblika grafita prema HRN EN ISO 945:2009. Oblik VI – nodularni grafit	6
Slika 5. Klasifikacija oblika grafita prema normi ASTM A247. Oblik I – nodularni grafit	6
Slika 6. Ravnotežni dijagram stanja Fe-C do 5,0% C	10
Slika 7. Ravnotežni dijagram stanja Fe-C - 2,5% Si	10
Slika 8. Shematski prikaz idealne (crvena linija) i stvarne (plava linija) krivulje hlađenja podeutektičkog nodularnog lijeva	11
Slika 9. Optimalno područje ugljika i silicija u proizvodnji nodularnog lijeva	13
Slika 10. Utjecaj elemenata kemijskog sastava na temperaturu skrućivanja stabilnog (γ +grafit) i metastabilnog (γ +cementit) eutektika	14
Slika 11. Utjecaj legirajućih elemenata na dubinu odbjela. Udio ugljika 3,0 do 3,3 %	15
Slika 12. a) utjecaj silicija na prijelaznu temperaturu žilavo/krhko, b) utjecaj silicija na udarni rad loma pri različitim temperaturama za feritni nodularni lijev	16
Slika 13. Utjecaj sadržaja silicija i debljine stjenke na dopušteni sadržaj mangana	17
Slika 14. Metalografska snimka mikrostrukture uzorka taljevine nodularnog lijeva u nagrizenom stanju (nital). Zbog visokog sadržaja fosfora (P=0,085 %) u mikrostrukтури je prisutan fosfidni eutektik	18
Slika 15. a) utjecaj fosfora i silicija u nodularnom lijevu na udarni rad loma, b) utjecaj fosfora i silicija na prijelaznu temperaturu žilavo/krhko	19
Slika 16. Metalografske snimke mikrostrukture perlitnog nodularnog lijeva (Cu=0,48) u nenagrizenom(a) i nagrizenom (b) stanju nital pri povećanju 100x. Udio ferita 38,7%, udio perlita 61,3%, 80 nodula/mm ² , nodularnost 70%	20
Slika 17. Utjecaj sadržaja bakra na udio perlita u mikrostrukтури nodularnog lijeva	21
Slika 18. Utjecaj nodularnosti grafita na udarni rad lima feritnog nodularnog lijeva	24
Slika 19. Utjecaj broja nodula/mm ² na nodularnost grafita	25
Slika 20. Utjecaj broja nodula u feritnom nodularnom lijevu na udarni rad loma	26
Slika 21. Utjecaj udjela perlita u mikrostrukтури na tvrdoću nodularnog lijeva	27
Slika 22. Utjecaj udjela perlita u mikrostrukтури na vlačnu čvrstoću nodularnog lijeva	27
Slika 23. Normirane veličine grafitnih nodula (grafit oblika VI.) u nodularnom lijevu	28
Slika 24. Mikrostruktura nodularnog lijeva različitih nodularnosti: (a) 90%, (b) 80%, (c) 50%	29
Slika 25. (a) utjecaj nodularnost na mehanička svojstva nodularnog lijeva, (b) utjecaj udjela silicija (cjepivo) na broj nodula/mm ² za tri debljine stjenke	30
Slika 26. Mikrostruktura feritnog (a) i perlitnog (b) nodularnog lijeva, povećanje 100x, nagriženo 4% nitalom	31
Slika 27. Konvecionalna granica razvlačenja i vlačna čvrstoća nodularnog lijeva pri različitim udjelima perlita i nodularnostima	31
Slika 28. Udarni rad loma na različitim temperaturama za različite vrste nodularnog lijeva	32
Slika 29. Utjecaj debljine stjenke na mehanička svojstva nodularnog lijeva	33
Slika 30. Srednje - frekventna indukcijska peć	34

Slika 31. Toplinska analiza Quick – cup čašicom.....	35
Slika 32. Ulijevanje primarne taljevine u lonac.....	37
Slika 33. Lijevanje taljevine u kalupe	38
Slika 34. YII - proba prema normi HRN EN 1563.....	39
Slika 35. Uređaj za ispitivanje kemijskog sastava	40
Slika 36. Spektrografska pločica.....	40
Slika 37. Izdvojeni uzorak za ispitivanje.....	41
Slika 38. Uređaj za brušenje uzoraka	42
Slika 39. Ultrazvučna čistilica	43
Slika 40. Uređaj za poliranje uzoraka	43
Slika 41. Svjetlosni mikroskop	44
Slika 42. Računalo povezano s mikroskopom	44
Slika 43. Epruveta za statičko vlačno ispitivanje B 14 x 70	45
Slika 44. Uređaj za ispitivanje mehaničkih svojstava	46
Slika 45. Mikrostrukture uzoraka od nodularnog lijeva različitih debljina stijenke s višim CE pri različitim povećanjima u nenagrizenom stanju.....	50
Slika 46. Mikrostrukture uzoraka od nodularnog lijeva različitih debljina stijenke s nižim CE pri različitim povećanjima u nenagrizenom stanju.....	51
Slika 47. Mikrostrukture uzoraka od nodularnog lijeva različitih debljina stijenke s višim CE pri različitim povećanjima u nagrizenom stanju (nital 3%).....	52
Slika 48. Mikrostrukture uzoraka od nodularnog lijeva različitih debljina stijenke s nižim CE pri različitim povećanjima u nagrizenom stanju (nital 3%).....	53
Slika 49. Kalibriranje slike, odnosno unošenje mjerila.....	54
Slika 50. Korištenje opcije CROP	55
Slika 51. Tip slike 32 – bit.....	55
Slika 52. Opcija threshold.....	56
Slika 53. Analiza mikrostrukture	56
Slika 54. Prikaz zastupljenosti grafita	57

POPIS TABLICA

Tablica 1. Mehanička svojstva nodularnog lijeva izmjerena na ispitnim uzorcima koji su dobiveni mehaničkom obradom iz odvojeno lijevanih ispitnih uzoraka	7
Tablica 2. Normom propisani udarni rad loma nodularnog lijeva, ovisno o debljini stijenke	8
Tablica 3. Normiranje nodularnog lijeva prema tvrdoći	9
Tablica 4. Sastav primarne taljevine višeg CE za proizvodnju nodularnog lijeva	35
Tablica 5. Sastav primarne taline nižeg CE za proizvodnju nodularnog lijeva	36
Tablica 6. Kemijski sastav nodulatora i cjepiva	36
Tablica 7. Kemijski sastav primarne taljevine nodularnog lijeva s višim CE	47
Tablica 8. Kemijski sastav primarne taljevine nodularnog lijeva s nižim CE	47
Tablica 9. Kemijski sastav noduliranog nodularnog lijeva s višim CE	48
Tablica 10. Kemijski sastav noduliranog nodularnog lijeva s nižim CE	48
Tablica 11. Prikaz postignutih CE dobivenih toplinskom analizom	49
Tablica 12. Prikaz udjela grafita u mikrostrukturi	58
Tablica 13. Prikaz mehaničkih svojstava ispitivanih odljevaka	59

POPIS OZNAKA

Oznaka	Veličina	Jedinica
A	- istezljivost	%
R_m	- vlačna čvrstoća	N/mm^2
$R_{p,0,2}$	- konvecionalna granica razvlačenja	N/mm^2
T_{EP}	- temperatura eutektičkog pothlađenja	$^{\circ}C$
T_{ER}	- temperatura eutektičke rekalescencije	
ϑ_{EP}	- temperatura eutektičkog pothlađenja	$^{\circ}C$
ϑ_{ER}	- temperatura eutektičke rekalescencije	$^{\circ}C$
ϑ_{ES}	- temperatura početka eutektičkog skrućivanja	$^{\circ}C$
ϑ_L	- likvidus temperatura	$^{\circ}C$
ϑ_S	- temperatura solidusa	$^{\circ}C$
CE	- ekvivalent ugljika	
HB	- tvrdoća po Brinellu	

1. UVOD

Tehnologija lijevanja jedna je od najstarijih i najdjelotvornijih načina oblikovanja predmeta od metala kojom se rastaljeni metal oblikuje ulijevanjem u kalupe na način da poprima oblik i dimenzije kalupne šupljine i zadržava ga nakon skrućivanja. Visoka produktivnost i laka mogućnost izrade replika čine ovu tehnologiju iznimno pogodnom za serijsku i masovnu proizvodnju. Ona je često i jedina tehnologija kojom se mogu izraditi vrlo složeni dijelovi s unutarnjim šupljinama ili za velika i masivna kućišta strojeva.

Problemi s kvalitetom pojavili su se odmah u početku, prije šest tisuća godina, pojavom poroznosti pri lijevanju bakrenih legura. Tehnološko unaprjeđenje lijevanja moralo se čekati skoro tisuću godina da bi ga se primijenilo tek kod lijevanja bronce. Nakon toga uslijedio je ubrzan razvoj ove tehnologije izradom boljih peći i kvalitetnijim rješenjima kalupa.

Tijekom prve polovine srednjeg vijeka došlo je do zastoja u razvoju ljevarstva kao i svih ostalih djelatnosti. Sve do kraja 19. stoljeća ljevarstvo odlikuje individualna proizvodnja, gdje dominira majstor-pojedinaac. Krajem 19. i početkom 20. stoljeća konstruirana je peć za taljenje - kupolka, koja donosi promjene u koncepciji po kojoj se proizvodnja bazira na sofisticiranim strojevima, a ne kao ranije na kvalificiranim radnicima-majstorima.

Za dobivanje svakog lijevanog proizvoda/materijala postoje određene specifičnosti u procesu lijevanja koje treba ispoštivati kako bi se dobila zahtijevana struktura, a time i svojstva.

Stoga ljevarstvo još uvijek spada u rizične tehnologije, jer je proces kontinuiran pa ga je teško u cijelosti kontrolirati. Upravo prethodno spomenuto posebno vrijedi za nodularni lijev, čije su otkriće i razvoj dio novije metalurške povijesti.

Nodularni lijev ima znatno veću čvrstoću od sivog lijeva, ali mu je sposobnost prigušivanja vibracija i obradivost lošija od one koju ima sivi lijev. Posebna prednost nodularnog lijeva, u odnosu na sivi lijev i nelegirane čelike, je visina granice razvlačenja. Obzirom da kemijski i fizikalni utjecaji koji povišuju granicu razvlačenja, snizuju vrijednost udarne žilavosti, kod nodularnog lijeva su u dobroj međusobnoj recipročnoj vezi granica razvlačenja i udarna žilavost. Dobra mehanička svojstva

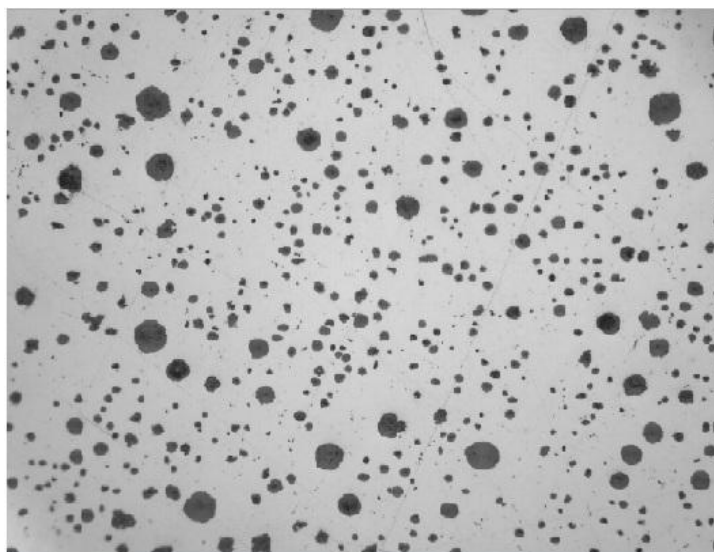
nodularnog lijeva su posljedica povoljne mikrostrukture koja se postiže već u lijevanom stanju, a ovisi o kemijskom sastavu te metalurškim postupcima. Naknadnim toplinskim i mehaničkim obradama ranije spomenuta svojstva odljevaka mogu se dodatno poboljšati.

Sve su to razlozi stalnog porasta proizvodnje nodularnog lijeva od njegovog otkrića do danas. [1,2,7]

2. NODULARNI LIJEV

2.1. Osnovne značajke nodularnog lijeva

Nodularni lijev je vrsta željeznog lijeva kod kojeg je ugljik izlučen u obliku grafitnih nodula (kuglica). Upravo zbog specifičnog (nodularnog, kugličastog) oblika grafita ima povoljnu kombinaciju svojstava. Karakterizira ga visoko istezanje, visoka granica razvlačenja (u odnosu na sivi lijev), dobra žilavost, livljivost i strojna obradivost, dok je vlačna čvrstoća na razini vrijednosti vlačne čvrstoće čeličnog lijeva.



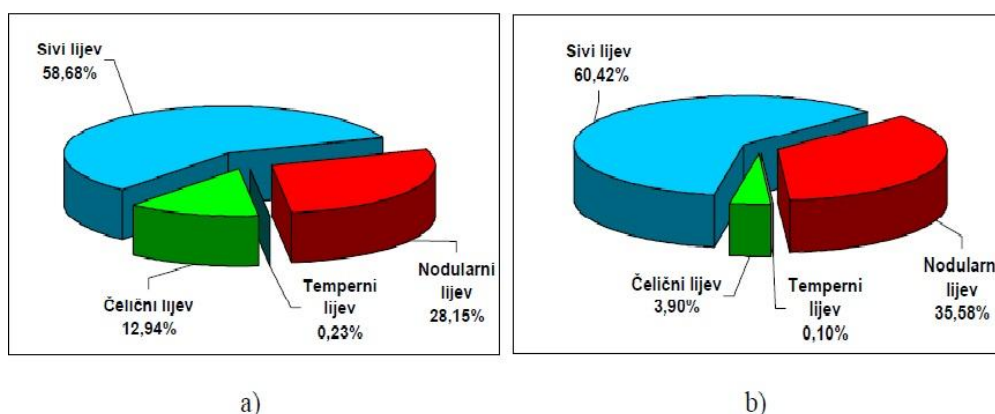
Slika 1. Mikrostruktura feritno-perlitnog nodularnog lijeva, povećanje 100x [3]

Zbog povoljne kombinacije svojstava nodularni lijev je u mnogim aplikacijama zamijenio sivi, čelični i temper lijev.

Svojstva nodularnog lijeva prvenstveno ovise o njegovoj mikrostrukturi, odnosno o obliku, veličini i raspodjeli izlučenog grafita te strukturi metalne osnove. Mikrostruktura ovisi o kemijskom sastavu, ali i brojnim drugim faktorima. Značajnu ulogu ima brzina hlađenja tijekom i nakon završetka skrućivanja te struktura metalnog uložka od kojeg je izrađen nodularni lijev. O brzini hlađenja ovisi oblik i broj grafitnih čestica te pojava karbida u mikrostrukturi. Struktura metalne osnove, odnosno udio ferita i perlita u velikoj mjeri ovisi o brzini hlađenja nakon završetka skrućivanja. Struktura metalnog uložka, odnosno udio sivog sirovog željeza, čeličnog otpada i povratnog materijala utječe na metaluršku kvalitetu taljevine, odnosno broj

grafitnih nodula u mikrostrukтури, nodularnosti grafita te nastanak karbida. Osim toga, broj nodula utječe na strukturu metalne osnove. [2,6]

Proizvodnja nodularnog lijeva u svijetu bilježi rast iz godine u godinu. Tijekom 2005. godine u svijetu je proizvedeno 19,6 milijuna tona nodularnog lijeva, što predstavlja 28,15 % od ukupne količine proizvedenih odljevaka od željeznih ljevova. Razlog takvom rastu u odnosu na ostale materijale jest u njegovim najnižim troškovima po jedinici čvrstoće u odnosu na konkurentne materijale. U Hrvatskoj je je tijekom 2006. godine proizvedeno 18 243 t odljevaka od nodularnog lijeva, što je za 240 % više u odnosu na 1990. godinu. Udio odljevaka od nodularnog lijeva u ukupnoj količini proizvedenih odljevaka od željeznih ljevova tijekom 2006. godine u Hrvatskoj iznosi 35,58%. [2]



Slika 2. a) u svijetu u 2005. godini, b) u Hrvatskoj u 2006. godini [2]

Danas postoji više postupaka za proizvodnju nodularnog lijeva. Karakteristika svih postupaka je da se nodularni lijev proizvodi modifikacijom oblika izlučenog grafita (polazne, bazne) taljevine modifikatorima (predlegurama), pri čemu se dobiva karakteristični kuglasti oblik grafita. Najčešće primjenjivani modifikatori su legure na bazi magnezija.

Više od 1/3 svjetske proizvodnje nodularnog lijeva odnosi se na izradu vodovodnih armature (cijevi, ventili), približno 1/3 primjenjuje se u industriji automobile i kamiona i 1/3 za razne konstrukcijske odljevke. Nodularni lijev je potigao najveći uspjeh u industriji automobila i kamiona, gdje postoji snažna konkurencija materijala obzirom na karakteristike i troškove.

Danas se uspješno izrađuju raznovrsni odljevci od nodularnog lijeva mase od nekoliko grama do > 200 t, uz debljinu stjenki od nekoliko mm do > 500 mm. Neki tipični primjeri odljevaka nodularnog lijeva su: ventili, vodovodne cijevi, stapajice, koljenaste i bregaste osovine motora, zupčanici, poklopci kliznih ležaja, rotori pumpi i sl. [2,6]

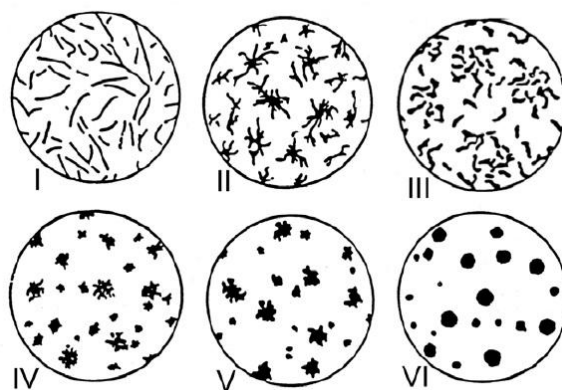
Slika 3 prikazuje primjere tipičnih odljevaka od nodularnog lijeva.



Slika 3. Primjeri odljevaka nodularnog lijeva [5]

2.2. Klasifikacija nodularnog lijeva

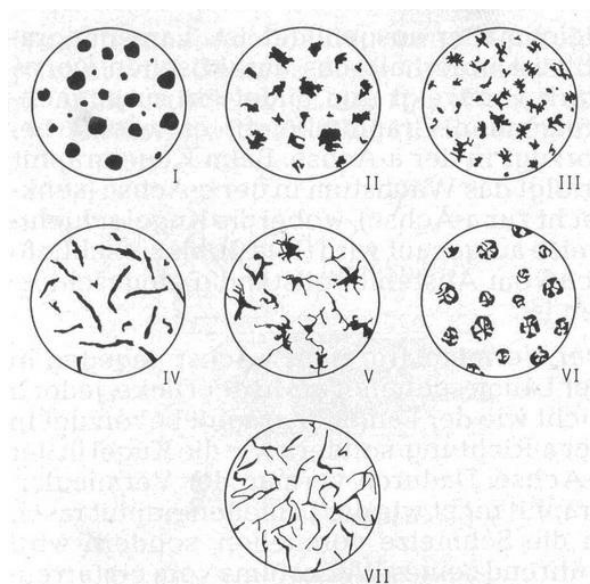
Nodularni lijev je vrsta željeznog lijeva čija je osnovna karakteristika izlučivanje grafita u tzv. nodularnom obliku sukladno HRN EN ISO 945:2009 ("Željezni lijev – označivanje mikrostrukture grafita"). Prema ovoj normi nodularni grafit označava se kao oblik VI. Morfologija nodularnog grafita prikazana je na slici 4. Označivanje ovog materijala (GJS) temelji se na HRN EN 1560:2012 ("Ljevarstvo – sustav označavanja željeznih ljevova").



Slika 4. Klasifikacija oblika grafita prema HRN EN ISO 945:2009. Oblik VI – nodularni grafit [3]

U svijetu postoji više prihvaćenih normi za nodularni lijev. U Hrvatskoj se za klasifikaciju nodularnog lijeva primjenjuje norma HRN EN 1563:2011. U osnovi radi se o preuzetoj europskoj normi EN 1563:2011, koja se primjenjuje u zemljama EU.

Poput norme HRN EN ISO 945:2009 i norma ASTM A247 definira moguće oblike grafita. Prema toj normi postoji sedam različitih oblika grafita. Nodularni grafit nosi oznaku I, a nepravilni nodularni grafit nosi oznaku II.



Slika 5. Klasifikacija oblika grafita prema normi ASTM A247. Oblik I – nodularni grafit [9]

Prema HRN EN 1563:2011 nodularni lijev klasificira se u više kvaliteta prema minimalnoj vrijednosti vlačne čvrstoće. U tablici 1 prikazane su minimalne zahtijevane vrijednosti mehaničkih svojstava nodularnog lijeva za svaku pojedinu kvalitetu prema HRN EN 1563:2011.

Tablica 1. Mehanička svojstva nodularnog lijeva izmjerena na ispitnim uzorcima koji su dobiveni mehaničkom obradom iz odvojeno lijevanih ispitnih uzoraka [4]

Označavanje materijala:		Vlačna čvrstoća, Rm, MPa,min.	Konv. granica razvlačenja, Rp0,2, MPa, min.	Istezljivost, A, %, min.
Oznaka:	Broj:			
EN-GJS-350-22-LT ¹⁾	EN-JS1015	350	220	22
EN-GJS-350-22-RT ²⁾	EN-JS1014	350	220	22
EN-GJS-350-22	EN-JS1010	350	220	22
EN-GJS-400-18-LT ¹⁾	EN-JS1025	400	240	18
EN-GJS-400-18-RT ²⁾	EN-JS1024	400	250	18
EN-GJS-400-18	EN-JS1020	400	250	18
EN-GJS-400-15	EN-JS1030	400	250	15
EN-GJS-450-10	EN-JS1040	450	310	10
EN-GJS-500-7	EN-JS1050	500	320	7
EN-GJS-600-3	EN-JS1060	600	370	3
EN-GJS-700-2	EN-JS1070	700	420	2
EN-GJS-800-2	EN-JS1080	800	480	2
EN-GJS-900-2	EN-JS1090	900	600	2

¹⁾ LT (engl. low temperature) – žilavost pri niskoj temperaturi

²⁾ RT (engl. room temperature) – žilavost pri sobnoj temperaturi

Iz tablice 1 može se vidjeti da se oznaka pojedine kvalitete nodularnog lijeva sastoji od kombinacije brojeva i slova. Npr. u oznaci EN-GJS-350-22-LT, EN se odnosi na europsku normu, slovo G označava lijev, slovo J željezo, slovo S označava nodularni grafit, broj 350 označava minimalnu vrijednost vlačne čvrstoće, a 22 predstavlja minimalnu vrijednost istezanja. Poslije minimalne vrijednosti istezanja u oznaci može biti i slovo U koje označava da se radi o ispitnom uzorku koji je lijevan s odljevkom ili slovo S koje označava da se radi o posebno lijevanom uzorku. [2,3,4,8]

U tablici 2 prikazane su normom propisane vrijednosti udarnog rada loma nodularnog lijeva prema normi HRN EN 1563:2011, uzevši u obzir i utjecaj debljine stijenke.

Prikazane su vrijednosti udarnog rada loma pri sobnoj temperaturi te pri $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, mjerene na uzorcima s V-zarezom koji su dobiveni mehaničkom obradom odvojeno lijevanih probnih uzoraka.

Tablica 2. Normom propisani udarni rad loma nodularnog lijeva, ovisno o debljini stijenke [4]

Označivanje materijala:		Debljina stjenke s [mm]	Minimalna vrijednost udarnog rada loma, KV, J					
Oznaka:	Broj:		Pri sobnoj temperaturi 23±5 °C		Pri -20±2 °C		Pri -40±2 °C	
			Sr.vr. 3 mj. ¹⁾	Pojed. vr. ²⁾	Sr.vr. 3 mj.	Pojed. vr	Sr.vr. 3 mj.	Pojed.v r.
EN-GJS-350-22U-LT	EN-JS1019	S ≤ 60	-	-	-	-	12	9
		60 < s ≤ 200	-	-	-	-	10	7
EN-GJS-350-22U-RT	EN-JS1029	S ≤ 60	17	14	-	-	-	-
		60 < s ≤ 200	15	12	-	-	-	-
EN-GJS-400-18U-LT	EN-JS1049	S ≤ 60	-	-	12	9	-	-
		60 < s ≤ 200	-	-	10	7	-	-
EN-GJS-400-18U-RT	EN-JS1059	S ≤ 60	14	11	-	-	-	-
		60 < s ≤ 200	12	9	-	-	-	-

Tablica 3 prikazuje propisane vrijednosti tvrdoće nodularnog lijeva prema HRN EN 1563:2011.

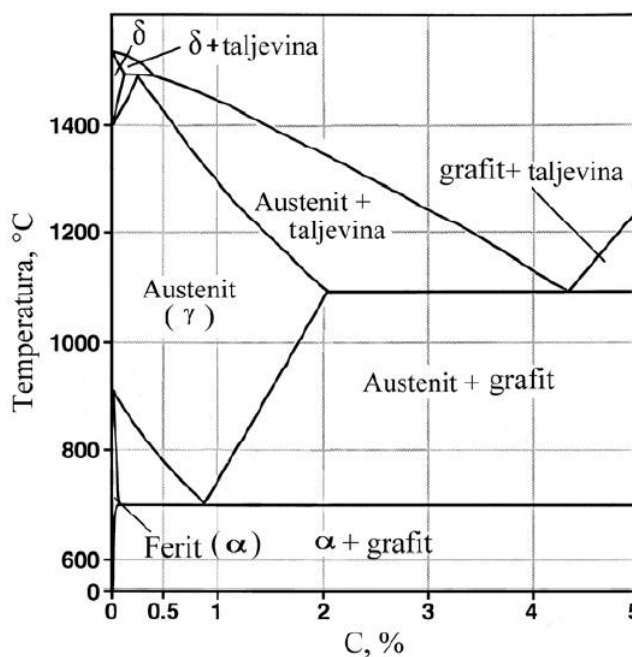
Tablica 3. Normiranje nodularnog lijeva prema tvrdoći [4]

Označivanje materijala		Tvrdoća HB	Ostale karakteristike (informativno)	
Oznaka	Broj		Rm MPa	Rp0,2 MPa
EN-GJS-HB130	EN-JS2010	manje od 160	350	220
EN-GJS-HB150	EN-JS2020	130 do 175	400	250
EN-GJS-HB155	EN-JS2030	135 do 180	400	250
EN-GJS-HB185	EN-JS2040	160 do 210	450	310
EN-GJS-HB200	EN-JS2050	170 do 230	500	320
EN-GJS-HB230	EN-JS2060	190 do 270	600	370
EN-GJS-HB265	EN-JS2070	225 do 305	700	420
EN-GJS-HB300*)	EN-JS2080*)	245 do 335	800	480
EN-GJS-HB330*)	EN-JS2090*)	270 do 360	900	600

*) EN-GJS-HB300 (EN-JS2080) i EN-GJS-HB330 (EN-JS2090) ne preporučuju se za tankostjene odljevke

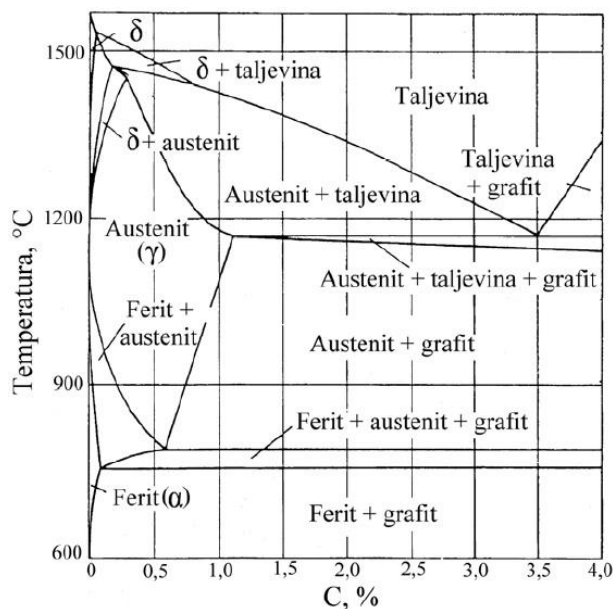
2.3. Skrućivanje nodularnog lijeva

Osnova za proučavanje skrućivanja željeznih ljevova s grafitom je ravnotežni dijagram Fe-C, prikazan na slici 6. Nodularni lijev, kao i ostale željezne ljevove s grafitom, karakterizira postojanje eutektičke reakcije.



Slika 6. Ravnotežni dijagram stanja Fe-C do 5,0% C [2]

Od svih prisutnih elemenata (osim ugljika) u nodularnom lijevu, silicij ima najveći utjecaj na sadržaj ugljika u eutektiku. Utjecaj silicija na Fe-C dijagram prikazan je na slici 7.



Slika 7. Ravnotežni dijagram stanja Fe-C - 2,5% Si [2]

Povećanjem sadržaja silicija eutektik se pomiče ka nižim sadržajima ugljika. Utvrđeno je da 1,0 % silicija snižava eutektički sastav za 0,31 % ugljika. Zbog toga se uvodi koncept ekvivalenta ugljika (CE) ili stupanj zasićenja (S_c):

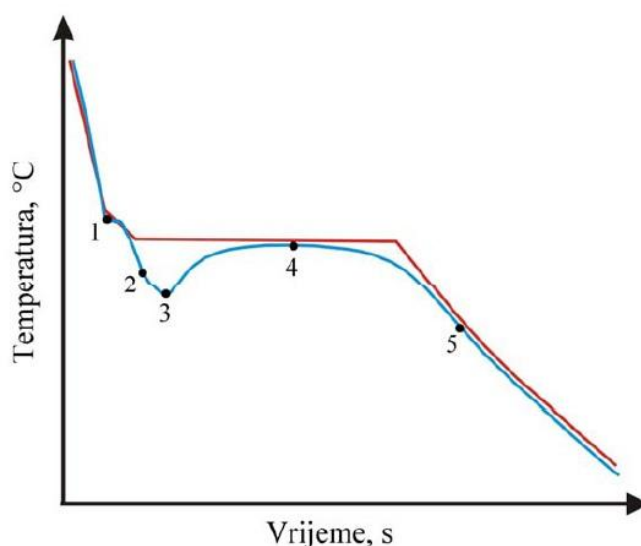
$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} \quad (1)$$

$$S_c = \frac{\%C}{4,26 - 1/3(\%Si + \%P)} \quad (2)$$

Kad je ekvivalent ugljika, CE, jednak 4,3, govori se o eutektičkom sastavu. Ako je vrijednost ekvivalenta ugljika $< 4,3$, radi se o podeutektičkom sastavu. U tom slučaju prva faza koja nastaje pri skrućivanju je austenit. Ako je vrijedost ekvivalenta ugljika $> 4,3$ govori se o nadeutektičkom sastavu. Prva faza koja se izlučuje tijekom skrućivanja nadeutektičkih sastava je primarni grafit (krupne i grube nodule).

Kada je $S_c = 1$ govori se o eutektičkom sastavu, ukoliko je $S_c < 1$ govori se o podeutektičkom sastavu, a u slučaju $S_c > 1$ o nadeutektičkom sastavu.

Promjene tijekom skrućivanja mogu se pratiti snimanjem krivulja hlađenja, odnosno toplinskom analizom. Krivulja hlađenja prikazuje promjenu temperature s vremenom tijekom skrućivanja. Na slici 8 prikazana je idealna (crvena linija) i stvarna (plava linija) krivulja hlađenja podeutektičkog nodularnog lijeva.



Slika 8. Shematski prikaz idealne (crvena linija) i stvarne (plava linija) krivulje hlađenja podeutektičkog nodularnog lijeva [2]

Kad se taljevina nodularnog lijeva ulije u kalup, ona se kontinuirano hladi sve dok se ne dostigne likvidus temperaturu T_L (točka 1, slika 8), kad nukleira primarni austenit, koji tijekom daljnjeg hlađenja raste u dendritnom obliku. Veličina dendrita određena je ekvivalentom ugljika, stupnjem zasićenja i brzinom skrućivanja. Niži ekvivalent ugljika rezultira većim dendritima, što je povezano sa širim intervalom skrućivanja. Bržim hlađenjem promovira se stvaranje finijih (sitnijih) dendrita. Tijekom izlučivanja primarnog austenita višak ugljika odbacuje se u taljevinu.

Preostala taljevina nastavlja s kontinuiranim hlađenjem sve do dostizanja temperature početka eutektičkog skrućivanja T_{ES} (točka 2), gdje između dendritnih grana u taljevini obogaćenoj ugljikom započinje nukleacija grafita i stvaranje eutektika. Kod temperature T_{ES} u taljevini je dostignut eutektički sadržaj ugljika od 4,3%. Dakle, po dostizanju eutektičke koncentracije odvija se pretvorba preostale taljevine u dvije krutine – jedna je eutektički austenit, a druga grafit. Umjesto grafita može nastati karbid Fe_3C , što ovisi o uvjetima pri skrućivanju. Karbidi imaju štetan utjecaj na svojstva i potrebno je izbjeći njihovo stvaranje.

Kod temperature T_{ES} neće se taljevina u potpunosti transformirati u dvije krute faze zbog nedostatka centara nukleacije, tj. klica u taljevini. Zbog toga temperatura taljevine nastavlja s padom (područje na krivulji hlađenja između točaka 2 i 3) sve dok se broj centara s kojih se pojavljuje rast eutektika i brzina rasta ne budu takvi da toplina oslobođena skrućivanjem eutektika (latentna toplina ili entalpija skrućivanja) ne prijeđe brzinu (intenzitet) odvođenja topline od strane kalupa (točka 3 – temperatura eutektičkog pothlađenja (T_{EP})). U biti govori se o pothlađenju taljevine, koje predstavlja pokretačku silu nukleacije. Kod točke 3 prestaje pothlađenje i zbog povoljnih nukleacijskih uvjeta odvija se razdvojeni rast eutektika austenit-nodularni grafit. Razdvojeni rast grafita i austenita posljedica je različitih mehanizama rasta.

Tijekom skrućivanja globule austenit - nodularni grafit povezuju se međusobno te s dendritima austenita. U ovakvom nasumičnom rasporedu, pojedinačne grupe globula austenit-nodularni grafit međusobno su odvojene taljevinom. Ove grupe nazivaju se eutektičke ćelije. Kako skrućivanje napreduje, taljevina se osiromašuje ugljikom.

Budući da se eutektičko skrućivanje odvija u temperaturnom intervalu, s napredovanjem skrućivanja mijenja se sastav nastalog austenita i taljevine. Elementi prisutni u taljevini koji segregiraju pozitivno (u taljevinu) koncentriraju se tijekom

skrućivanja u intercelijastim područjima koja posljednja skrućuju. Obzirom da toplina oslobođena tijekom skrućivanja eutektika premašuje toplinu odvedenu od strane kalupa, dolazi do povišenja temperature pri skrućivanju (područje od točke 3 do točke 4). Ovaj fenomen poznat je pod nazivom rekalescencija. Točka 4 označava se kao temperatura eutektičke rekalescencije (T_{ER}).

Kako se eutektičko skrućivanje bliži završetku, postepeno se smanjuje oslobađanje entalpije skrućivanja i ponovno dolazi do pada temperature (područje između točaka 4 i 5). Eutektičko skrućivanje završava pri temperaturi solidusa T_s (točka 5).

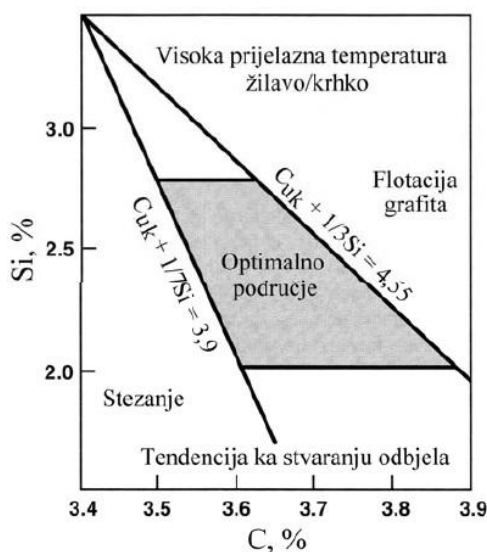
Skrućivanje nodularnog lijeva nadeutektičkog sastava odvija se na identičan način s razlikom da je prva faza koja se izlučuje grafit u nodularnom obliku. Kada se sadržaj ugljika u taljevini i temperatura dovoljno snize, preostala taljevina skrućuje u obliku eutektičkih ćelija. [2]

2.4. Utjecaj kemijskog sastava i mikrostrukture na mehanička svojstva nodularnog lijeva

Kemijski sastav je važan faktor koji utječe na oblik grafita i strukturu metalne osnove u nodularnom lijevu.

2.4.1. Utjecaj stalnih elemenata

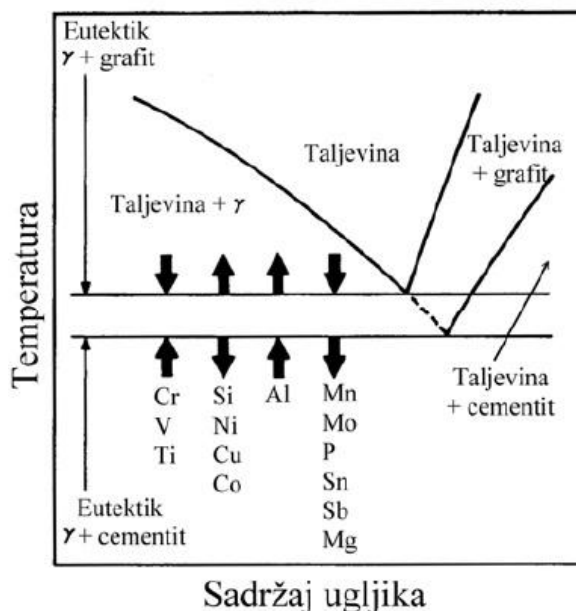
Optimalni udio ugljika i silicija može se odrediti iz Handersonovog dijagrama prikazanog na slici 9.



Slika 9. Optimalno područje ugljika i silicija u proizvodnji nodularnog lijeva [2]

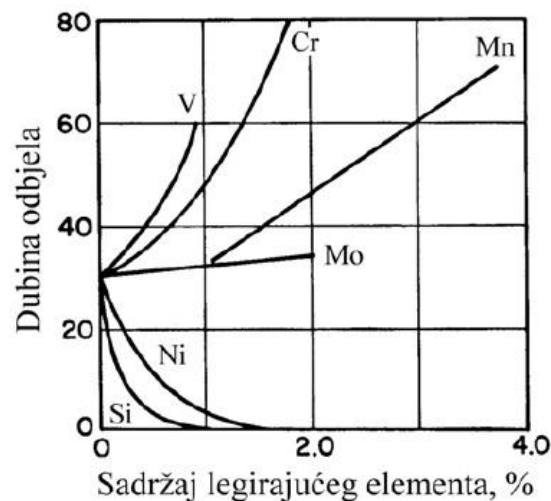
Iz dijagrama na slici 9 može se zaključiti da se optimalni sadržaj ugljika kreće u granicama od 3,5 – 3,9 %, ovisno o sadržaju silicija. Više vrijednosti udjela ugljika preferiraju se za tanje stijenke, a niže vrijednosti za deblje stijenke. Kombinacija visokih vrijednosti sadržaja ugljika, tj. ekvivalenta ugljika i niskih brzina hlađenja (debele stijenke) može rezultirati flotacijom (isplivavanjem na površinu) i degeneracijom nodula, što ima negativan učinak na mehanička svojstva nodularnog lijeva. Kod tankih stijenki ne postoji opasnost od flotacije, zbog čega se preferiraju više vrijednosti ekvivalenta ugljika u cilju izbjegavanja stvaranja karbida. Visoke vrijednosti sadržaja ugljika povećavaju ekspanziju tijekom skrućivanja. U većini slučajeva nodularni lijev ima sastav blizu eutektičkog.

Silicij smanjuje topljivost ugljika u čvrstoj i tekućoj fazi, povećava difuziju ugljika pri svim temperaturama te promovira stvaranje grafita (djeluje kao grafitizator), odnosno otežava stvaranje karbida. Kao i ostali grafitizatori, tijekom skrućivanja segregira u krutu fazu te podiže temperature skrućivanja stabilnog eutektika (Fe-C) i snižava temperaturu skrućivanja metastabilnog eutektika (Fe-Fe₃C) (slika 10). Kod iste kvalitete nodularnog lijeva, viši sadržaji silicija preporučuju se kod lijevanja tankostjenih odljevaka, da bi se smanjila mogućnost stvaranja karbida.



Slika 10. Utjecaj elemenata kemijskog sastava na temperaturu skrućivanja stabilnog (γ+grafit) i metastabilnog (γ+cementit) eutektika [2]

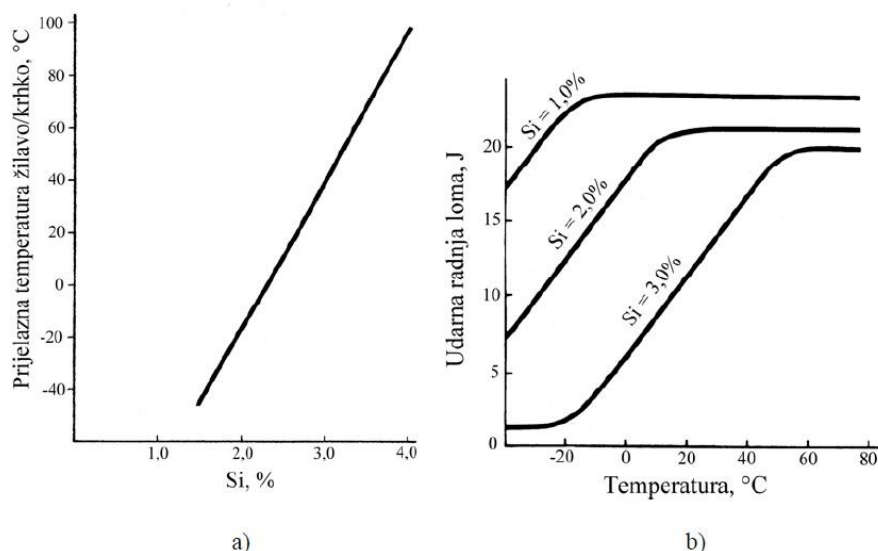
Grafitizatori putem proširenja intervala između eutektičkih temperatura smanjuju opasnost od metastabilnog skrućivanja (stvaranja odbjela – cementita) (slika 11). Karbidotvorci (npr. krom, vanadij itd.) djeluju suprotno.



Slika 11. Utjecaj legirajućih elemenata na dubinu odbjela. Udio ugljika 3,0 do 3,3 %
[2]

Dodatkom silicija proširuje se i pomiče trofazno područje ka višim temperaturama, jer silicij podiže temperature T_T i T_{EODP} . Zbog toga, za danu brzinu hlađenja, na raspolaganju stoji više vremena za difuziju ugljika, što u konačnici potpomaže (promovira) stvaranje ferita.

S porastom udjela ferita povećava se žilavost i izduženje nodularnog lijeva, a smanjuje vlačna čvrstoća i granica razvlačenja. Sadržaj silicija iznad potrebnog za stvaranje pretežno feritne metalne osnove rezultira smanjenjem žilavosti (slika 12) i izduženja te porastom čvrstoće i tvrdoće feritnog nodularnog lijeva.



Slika 12. a) utjecaj silicija na prijelaznu temperaturu žilavo/krhko, b) utjecaj silicija na udarni rad loma pri različitim temperaturama za feritni nodularni lijev [12]

Sa slike 12 može se vidjeti da porast sadržaja silicija utječe na smanjenje udarnog rada loma (udarne žilavosti) i povišenje prijelazne temperature žilavo/krhko, premda promovira stvaranje ferita koji je poželjan kod kvaliteta koje moraju posjedovati visoku udarnu žilavost i duktilnost. Efekt je izraženiji kod feritnih nodularnih lijevova u odnosu na feritno-perlitne i perlitne nodularne lijevove.

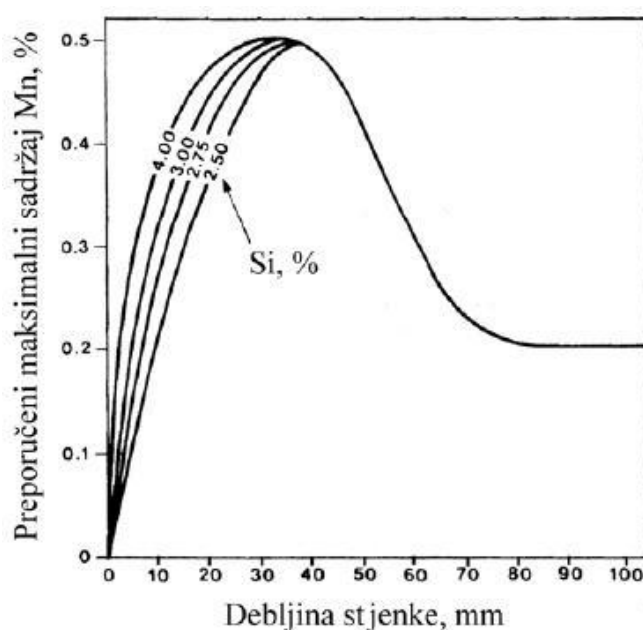
Pad udarne žilavosti i duktilnosti nodularnog lijeva s porastom sadržaja silicija tumači se očvršćivanjem ferita od strane silicija i smanjenjem njegove plastičnosti. U cilju postizanja optimalne žilavosti nodularnog lijeva koji se primjenjuje pri uobičajenim temperaturama, sadržaj silicija treba održavati u granicama od 2,0 – 2,8 %. Primjena pri niskim temperaturama zahtjeva što je moguće niži sadržaj silicija (2,0 – 2,5 %).

Zbog promoviranja stvaranja ferita, u proizvodnji perlitnog nodularnog lijeva sadržaj silicija treba biti < 2,0 %. [11]

Mangan promovira stvaranje perlita i karbida jer snižava temperaturu skrućivanja stabilnog (Fe-C), ali i metastabilnog eutektika (Fe-Fe₃C) (slika 10). Mangan proširuje austenitno područje snižavajući eutektoidne temperature T_T i T_{E0IDP} . Stabilizira austenit jer povećava topljivost ugljika u njemu. Brzina stvaranja ferita je sporija kod nižih temperatura jer se sa sniženjem temperature smanjuje brzina difuzije ugljika. Time se uspostavlja povišen sadržaj ugljika u austenitu i promovira stvaranje perlita. Prisustvo karbida u mikrostrukтури utječe na smanjenje vlačne čvrstoće, izduženja i

udarne žilavosti. U cilju izbjegavanja stvaranja karbida, potrebno je sadržaj mangana održavati što nižim (0,1 – 0,2 %).

Dopušteni sadržaj mangana određen je sadržajem silicija i debljinom stijenke odljevka, kako je i prikazano na slici 13. U tankim stijenkama (do 30 mm) sklonost mangana ka stvaranju karbida može se izbalansirati porastom sadržaja silicija. Međutim, kod debelostjenih odljevaka utjecaj mangana na stvaranje karbida ne može se kontrolirati sadržajem silicija jer mangan preferirano segregira u taljevinu koja zadnja skrućuje (potiskuje se ispred fronta kristalizacije). Pri tome dolazi do stvaranja karbida po granicama zrna.



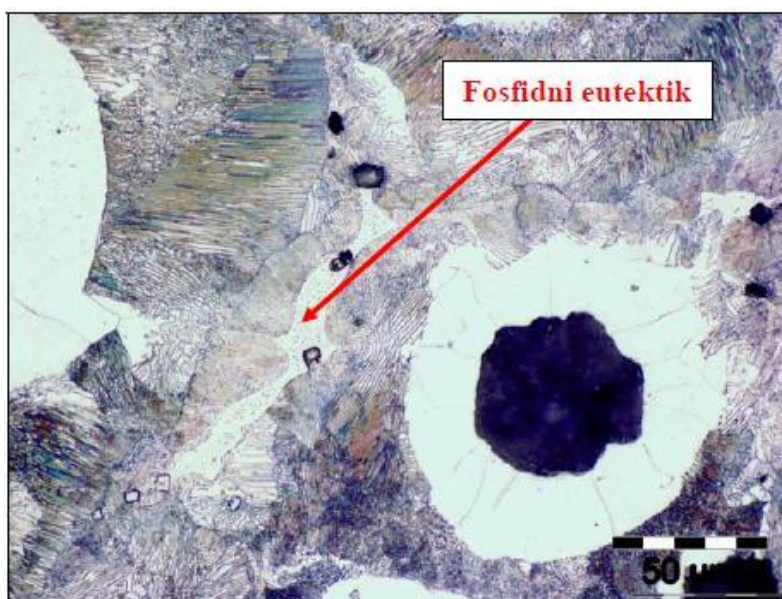
Slika 13. Utjecaj sadržaja silicija i debljine stijenke na dopušteni sadržaj mangana [12]

Sumpor snižava temperaturu skrućivanja stabilnog (Fe-C) i metastabilnog (Fe-Fe₃C) eutektika, zbog čega doprinosi stvaranja odbjela, posebno kod viših sadržaja. Sumpor, kao i mangan sprječava grafitizaciju. Obzirom da se nodularni lijev proizvodi obradom primarne taljevine predlegurama na bazi magnezija i da magnezij ima visok afinitet prema sumporu, očito je da se sadržaj sumpora mora održavati niskim.

Reakcijama magnezija sa sumporom smanjuje se raspoloživa količina magnezija za modifikaciju oblika grafita, što može rezultirati nastankom vermikularnog, listićavog i degeneriranih oblika grafita. Prisutnost ovih oblika grafita u mikrostrukturi nodularnog lijeva negativno se odražava na njegova mehanička svojstva.

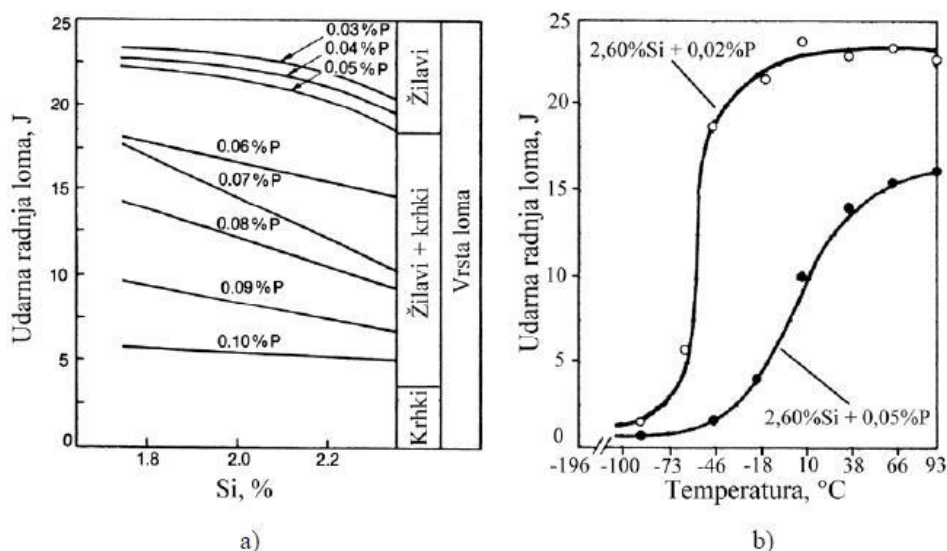
Preniski sadržaji sumpora ($<0,005\%$) također nisu poželjni jer čestice magnezijeva sulfida predstavljaju mjesta za nukleaciju grafita. Optimalni sadržaj sumpora kreće se od $0,008 - 0,015\%$.

Fosfor je nepoželjan element u nodularnom lijevu jer uzrokuje krhkost, zbog čega ga je potrebno održavati što je moguće nižim ($<0,02\%$). Kao i u sivom lijevu, stvara nisko topivi fosfidni eutektik (Fe_3P), prikazano na slici 14, koji je poznat pod nazivom steadit. Točka taljenja fosfidnog eutektika je niska i iznosi $\sim 950\text{ }^\circ\text{C}$. Tijekom skrućivanja segregira po granicama eutektičkih ćelija kao tvrda i krhka faza.



Slika 14. Metalografska snimka mikrostrukture uzorka taljevine nodularnog lijeva u nagrizenom stanju (nital). Zbog visokog sadržaja fosfora ($P=0,085\%$) u mikrostrukтури je prisutan fosfidni eutektik [2]

Kod većih sadržaja fosfora stvara se mreža fosfidnog eutektika po granicama eutektičkih ćelija. U tom slučaju, u tankim stjenkama, granice ćelija sadrže dvostruko više fosfora od prosječnog sadržaja, dok je u debelim stjenkama ($> 25,0\text{ mm}$) čak i do deset puta više od prosječnog sadržaja. To rezultira velikim padom čvrstoće, duktilnosti i udarne žilavosti, odnosno udarnog rada loma (slika 15).



Slika 15. a) utjecaj fosfora i silicija u nodularnom lijevu na udarni rad loma, b) utjecaj fosfora i silicija na prijelaznu temperaturu žilavo/krhko [12]

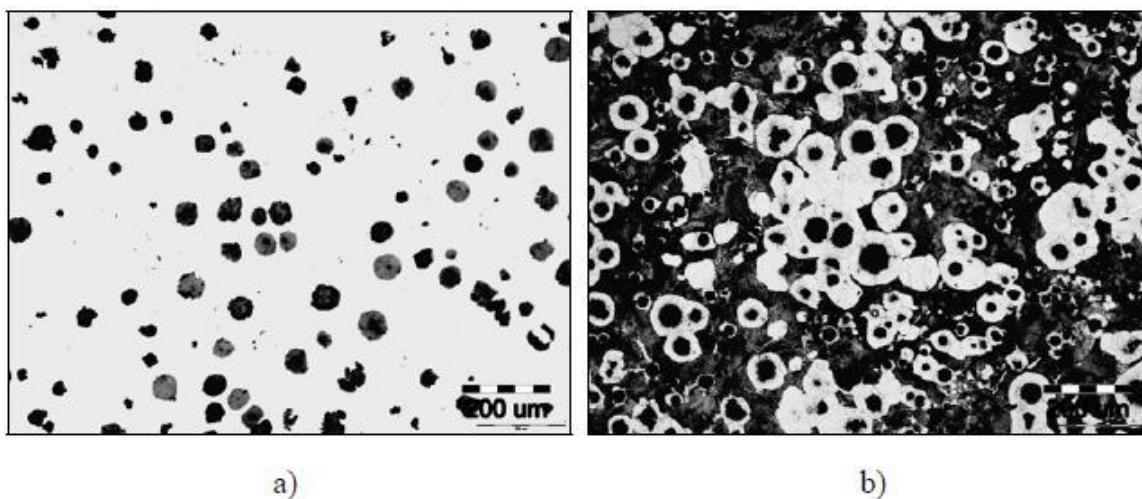
Fosfor snižava likvidus temperaturu te temperaturu skrućivanja stabilnog (Fe-C) i metastabilnog (Fe-Fe₃C) eutektika (slika 10). Pored stvaranja fosfornog eutektika, fosfora stabilizira perlit. Udio perlita u mikrostrukturi nodularnog lijeva raste s porastom sadržaja fosfora.

Modifikacija oblika grafita, odnosno stvaranje nodularnog grafita, najčešće se provodi obradom primarne taljevine predlegurom čiji je glavni sastojak magnezij. Magnezij dodan u primarnu taljevinu najprije dezoksidira (MgO) i odsumporava (MgS) taljevinu. Na taj način se smanjuje količina magnezija raspoloživog za modifikaciju oblika grafita. Ukoliko je sadržaj sumpora i kisika u taljevini nizak, tada je već rezidualni magnezij od ~ 0,018 % dovoljan za formiranje potpuno nodularne strukture grafita. Ciljani sadržaj rezidualnog magnezija u praksi kreće se od 0,035 – 0,045 %. Ostvareni rezidualni sadržaj magnezija ima značajan utjecaj na mikrostrukturu, a time i na mehanička svojstva nodularnog lijeva. Nizak rezidualni sadržaj magnezija rezultira nedovoljnom modifikacijom grafita (opasnost od stvaranja vermikularnog i listićavog grafita), odnosno smanjenom nodularnosti i brojem grafitnih nodula. U konačnici se to odražava na pad svih mehaničkih svojstava nodularnog lijeva. Ako je rezidualni magnezij previsok (> 0,06 %) postoji velika opasnost od stvaranja karbida, poroznosti i troske. Ovaj rizik pojačava se s porastom brzine skrućivanja i smanjenjem broja nodula. Zbog toga je potrebno primijeniti adekvatno cijepljenje

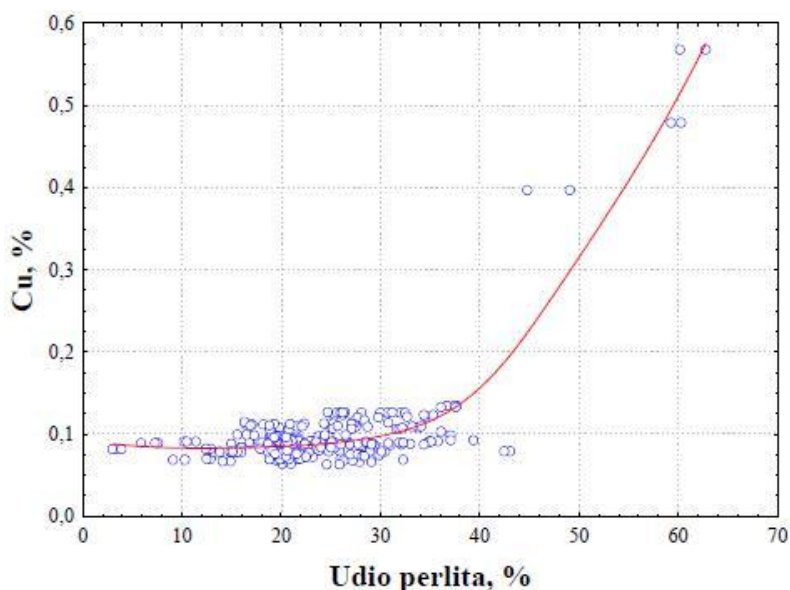
taljevine. Omjer Mg:S važan je za održavanje nodularnosti u nodularnom lijevu. Poželjno je da ovaj odnos bude iznad 3:0. [2,10]

2.4.2. Utjecaj legirajućih elemenata

Bakar je grafitizirajući element koji pospješuje stvaranje perlita i ne promovira stvaranje karbida. Povećava razliku između temperature skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika (slika 9) te snižava temperature T_T i T_{EOIDP} . Pri skrućivanju segreigra na površinu grafitnih nodula i djeluje kao difuzijska barijera za ugljik. Na taj način onemogućuje pretvorbu austenita u ferit i grafit, što rezultira stvaranjem perlita. Premda je maksimalna topivost bakra u nodularnom lijevu ~2,5 %, obično se ograničava na ~1,5 % da bi se izbjegao njegov utjecaj na nodularnost. već sadržaj od 0,82 % je dovoljan da bi se ostvarila potpuno perlitna mikrostruktura. U feritnom nodularnom lijevu sadržaj bakra treba biti što je moguće niži. Na slici 16 prikazana je mikrostruktura perlitnog nodularnog lijeva sa sadržajem bakra od 0,48 %, dok se sa slike 16 može vidjeti utjecaj bakra na udio perlita u mikrostrukturi. U odnosu na mangan, bakar je 5 – 10 puta efikasniji u stvaranju perlita i ne postoji opasnost od nastanka karbida kao u slučaju mangana. Zbog promoviranja stvaranja perlita, bakar povisuje vlačnu čvrstoću i tvrdoću, ali smanjuje izduženje i udarnu žilavost nodularnog lijeva te podiže prijelaznu temperaturu žilavo/krhko.



Slika 16. Metalografske snimke mikrostrukture perlitnog nodularnog lijeva (Cu=0,48) u nenagrizenom(a) i nagrizenom (b) stanju nital pri povećanju 100x. Udio ferita 38,7%, udio perlita 61,3%, 80 nodula/mm², nodularnost 70% [2]



Slika 17. Utjecaj sadržaja bakra na udio perlita u mikrostrukturi nodularnog lijeva [2]

Kositar je snažan promotor perlita. Mehanizam djelovanja je identičan kao kod bakra. U odnosu na bakar, kositar je približno 10 puta efikasniji u stvaranju perlita. Zbog toga sadrži između 0,03 – 0,08 %, što ovisi o debljini stijenke, već su dovoljni da se ostvari potpuno perlitna mikrostruktura. Sadržaj kositra > 0,1% nije poželjan jer nastali sloj oko grafitnih nodula, koji predstavlja difuzijsku barijeru za ugljik, postaje relativno deo i krhak, što ima negativan učinak na mehanička svojstva. Kositar otežava grafitizaciju, ali ne promovira stvaranje karbida. Snižava temperaturu skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika (slika 10), te kao i bakar, segregira u prvu taljevinu koja skrućuje (negativna segregacija). Utjecaj kositra na temperature T_T i T_{EODP} je zanemariv. Budući da pospješuje stvaranje perlita, kositar povisuje vlačnu čvrstoću i tvrdoću, ali smanjuje izduženje i udarnu žilavost nodularnog lijeva.

Molibden povisuje prokaljivost, vlačnu čvrstoću na sobnoj i visokim temperaturama, granicu razvlačenja te otpornost na lom, puzanje i toplinski umor nodularnog lijeva. Negativno utječe na izduženje i udarnu žilavost. Negativna strana molibdena je sklonost ka stvaranju karbida, ali u znatno manjoj mjeri od kroma.

Nikal podiže temperaturu skrućivanja stabilnog (Fe-C) i snižava temperaturu skrućivanja metastabilnog eutektika (Fe-Fe₃C) (slika 10). Nikal, kao i silicij, proširuje interval između navedenih temperatura i smanjuje sklonost ka stvaranju odbjela i nastanku karbida. Snižava eutektoidnu temperaturu i blago promovira stvaranje perlita. Pri skrućivanju segregira u prvu taljevinu koja skrućuje (negativna

segregacija). Nikal je grafitizirajući element koji povišuje prokaljivost (dodatak od 0,5 – 4,0 %), poboljšava svojstva feritnog nodularnog lijeva pri niskim temperaturama, poboljšava svojstva feritnog nodularnog lijeva pri niskim temperaturama, poboljšava vlačnu čvrstoću nodularnog lijeva s niskim sadržajem silicija te pospješuje stvaranje austenitne metalne osnove (dodatak 18,0 – 36 %). U feritnom nodularnom lijevu povećava granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću bez štetnog utjecaja na udarnu žilavost. Zbog toga se primjenjuje kao supstitucija za silicij u onim kvalitetama gdje se zahtjeva visoka čvrstoća i udarna žilavost.

Krom ima visoku sklonost ka stvaranju karbida (sprječava grafitizaciju) jer snižava temperaturu skrućivanja stabilnog eutektika (Fe-C) i povišuje temperaturu skrućivanja metastabilnog eutektika (Fe-Fe₃C). Kao i ostali karbidotvorci, tijekom skrućivanja segregira u taljevinu koja posljednja skrućuje. Čak se i dugotrajnim žarenjem na visokim temperaturama teško mogu u potpunost ukloniti ovi karbidi. Zbog toga njegov sadržaj u nodularnom lijevu treba biti što niži. Sklonost ka nastajanju karbida pospješuje se u prisustvu mangana. To zahtjeva još niže sadržaje kroma, ako je prisutan sadržaj mangana. Prokaljivost, tvrdoća i otpornost na trošenje nodularnog lijeva može se poboljšati legiranjem kromom.

Vanadij povišuje prokaljivost i ima visoku sklonost ka stvaranju interčelijastih karbida i odbjela, jer snižava temperaturu skrućivanja stabilnog eutektika (Fe-C) i povišuje temperaturu skrućivanja metastabilnog eutektika (Fe-Fe₃C) te slabo perlitizirajuće djelovanje. Kod uobičajenih kvaliteta nodularnog lijeva sadržaj vanadija potrebno je održavati što je moguće nižim zbog visoke sklonosti ka stvaranju karbida. S povećanjem brzine hlađenja raste opasnost od stvaranja karbida. [2]

2.4.3. Utjecaj pratećih elemenata

Modifikacija oblika grafita, odnosno stvaranje nodularnog grafita, može se postići obradom taljevine cerijem. Kao i magnezij, **cerij** je snažan dezoksidant i desulfurant, ali za razliku od magnezija, cerij nije lako ispariv (točka isparavanja iznosi 2406 °C). Cerij dodan u taljevinu neće uzrokovati snažne i burne reakcije te nastajanje dima karakterističnog za obradu taljevine magnezijem. Cerij stvara mnogo stabilnije okside i sulfide, zbog čega postoji daleko manja sklonost ka odgoru i stvaranju troske. Jak je promotor karbida, zbog čega primarna taljevina mora imati visok sadržaj ugljika (>3,8 %), a zahtjeva se i primjena adekvatnog cijepljenja. Nodularni lijev proizveden

obradom primarne taljevine cerijem mnogo je osjetljiviji na debljinu stjenke i u tankostjenim odljevcima teško je postići lijevnu strukturu bez karbida.

Lantan se preferira više od cerija u FeSiMg legurama za obradu. Obradom taljevine predlegurom koja u sebi ima čisti lantan umjesto uobičajene smjese rijetkih zemalja rezultira u konačnici superiornijim svojstvima nodularnog lijeva (veći broj nodula, viša nodularnost, manji udio perlita, manji odbjel) i bez naknadnog cijepjenja u odnosu na nodularni lijev proizveden obradom taljevine predlegurom koja u sebi sadrži čisti cerij.

Bor je jedan od najsnažnijih karbidotvornih elemenata. Karbidi bora su stabilni i ne mogu se ukloniti žarenjem. Već pri sadržaju od 0,002 % može doći do stvaranja intercelijastih karbida i značajnog pada mehaničkih svojstava. Npr. pri sadržaju bora od 0,01 % izduženje se može smanjiti s 14,0 % na 1,0 %.

Postoji niz elemenata koji već u minimalnim količinama otežavaju stvaranje grafitnih nodula, a samim tim utječu i na pad mehaničkih svojstava nodularnog lijeva. To su: aluminij, antimon, arsen, bizmut, kadmij, olovo i titan. Ovi elementi su snažni površinsko aktivni elementi koji se nastoje koncentrirati na graničnoj površini grafit/taljevina i grafit/kruta faza, zbog čega imaju značajan utjecaj na morfologiju grafita. Često se nazivaju antinodularizatori.

Maksimalni sadržaj **aluminija** u nodularnom lijevu trebao bi biti $< 0,03$ % jer pospješuje stvaranje listićavog i vermikularnog grafita te utječe na nastanak mikroporoznosti. Primjesnom FeSiMg predlegure za obradu koja sadrži cerij može se neutralizirati štetno djelovanje aluminija.

Antimon iznad 0,004 % onemogućuje stvaranje nodularnog grafita, posebno u debelostijenim odljevcima. Antimon spada u grupu koji snažno promoviraju stvaranje perlita.

Bizmut već kod niskih koncentracija pospješuje stvaranje listićavog grafita. Dodatkom bizmuta u vrlo malim koncentracijama (0,005 – 0,01 %) može se značajno povisiti broj nodula/mm² jer bizmut snažno promovira nukleaciju grafita. Prekomjerni dodatci bizmuta imaju negativan učinak na broj nodula/mm².

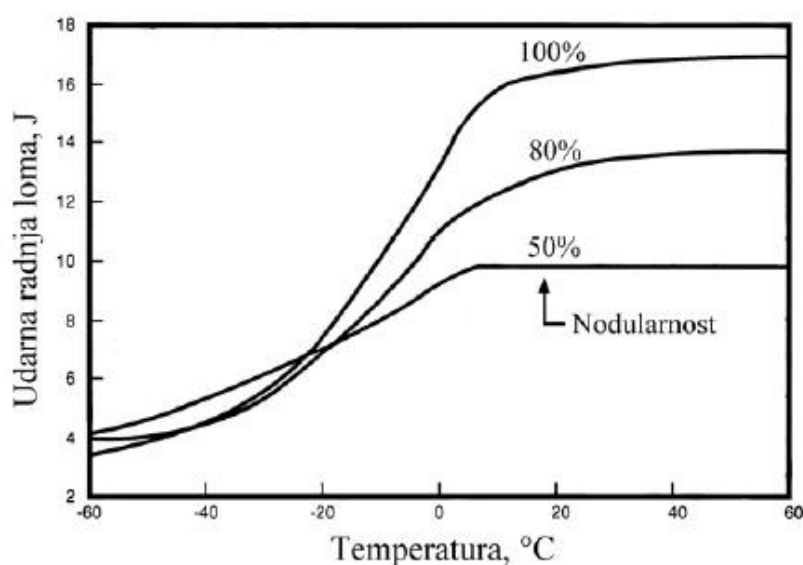
Kadmij potiče stvaranje listićavog grafita, zbog čega se njegov udio u nodularnom lijevu ograničava na $< 0,002$ %.

Olovo već pri udjelu od 0,002 % može rezultirati nastankom listićavog grafita. Ovaj efekt je izraženiji u debljim stjenkama.

Titan pospješuje stvaranje vermikularnog grafita i sužava područje između temperature skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika. Zbog štetnog utjecaja, udio titana bi trebao biti $< 0,035$ %. [2]

2.4.4. Utjecaj nodularnosti grafita

Nodularnost i morfologija nesferičnih čestica ima značajan utjecaj na mehanička svojstva nodularnog lijeva. Sa smanjenjem nodularnosti grafita opada vlačna čvrstoća, granica razvlačenja i udarna žilavost nodularnog lijeva (slika 18). Što je grafitna čestica bliže savršenom krugu (kugli) to ona za isti volumen zauzima manju površinu u mikrostrukтури, odnosno manje utječe na slabljenje metalne osnove. To u konačnici rezultira višim vrijednostima mehaničkih svojstava. Očito je da nastanak nodula slabe sferičnosti, vermikularnog, te eventualno degeneriranih oblika grafita utječe na sniženje udarne žilavosti nodularnog lijeva.

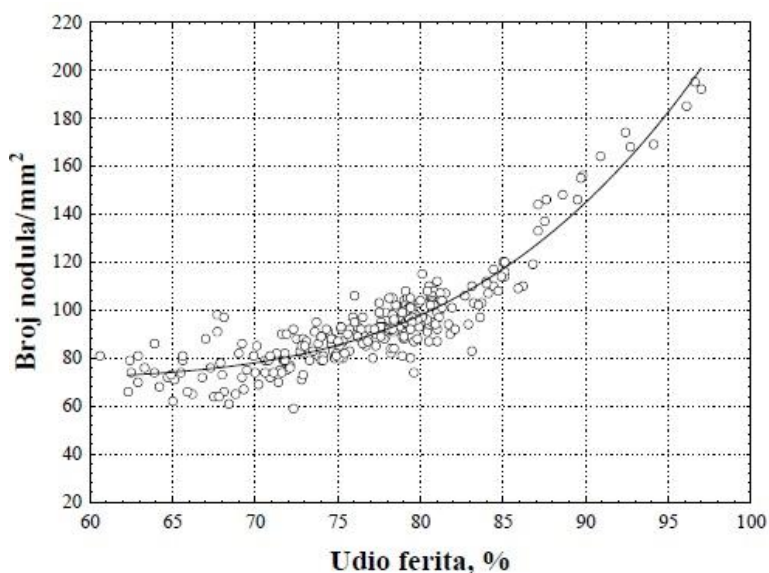


Slika 18. Utjecaj nodularnosti grafita na udarni rad lima feritnog nodularnog lijeva [2]

2.4.5. Utjecaj broja i veličine nodula

Broj grafitnih nodula (izražen kao broj grafitnih nodula/mm²) ima značajan utjecaj na udio ferita i perlita u metalnoj osnovi, a samim time i na mehanička svojstva nodularnog lijeva. Povećanje broja nodula rezultira većim udjelom ferita u mikrostrukтури (slika 19), jer se skraćuju putevi difuzije ugljika iz austenita pri

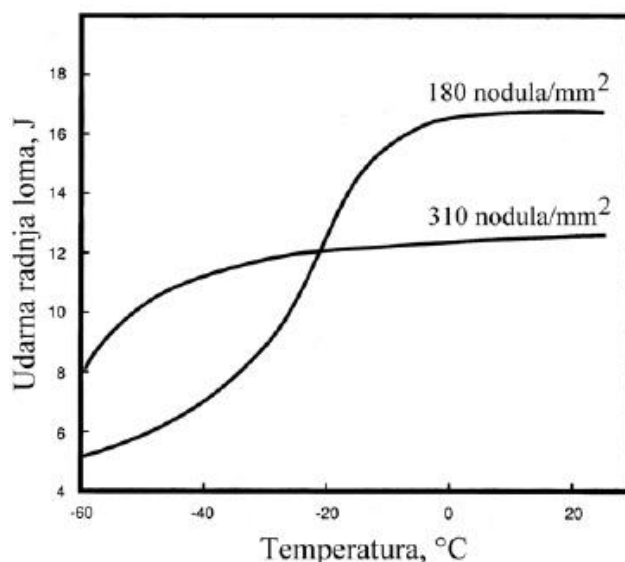
eutektoidnoj pretvorbi. Ovaj utjecaj broja nodula na udio ferita ne treba shvatiti jednoznačno. Naime, u tankim stjenkama, gdje su prisutne velike brzine hlađenja, prisutan je veliki broj manjih nodula, ali i povišeni udio perlita, velike brzine hlađenja otežavaju difuziju ugljika na nodule, što rezultira višim udjelom austenita s visokim sadržajem ugljika na eutektoidnoj temperaturi, odnosno višim udjelom perlita nakon eutektoidne pretvorbe.



Slika 19. Utjecaj broja nodula/mm² na nodularnost grafita [2]

Povećanje broja nodula utječe na smanjenje njihove veličine, što poboljšava vlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja, udarnu žilavost i otpornost na umor.

Cijepljenjem taljevine povećava se broj grafitnih nodula i poboljšava nodularnost. Prema tome, veliki broj nodula povezan je s poboljšanjem nodularnosti. Za svaki presjek odljevka, odnosno debljinu stijenke postoji optimalno područje broja nodula. Odstupanje od tog područja može rezultirati smanjenjem mehaničkih svojstava. Potrebno je obratiti pažnju na nukleacijski potencijal i cijepljenje taljevine. Slika 20 prikazuje utjecaj broja nodula u feritnom nodularnom lijevu na udarni rad loma.



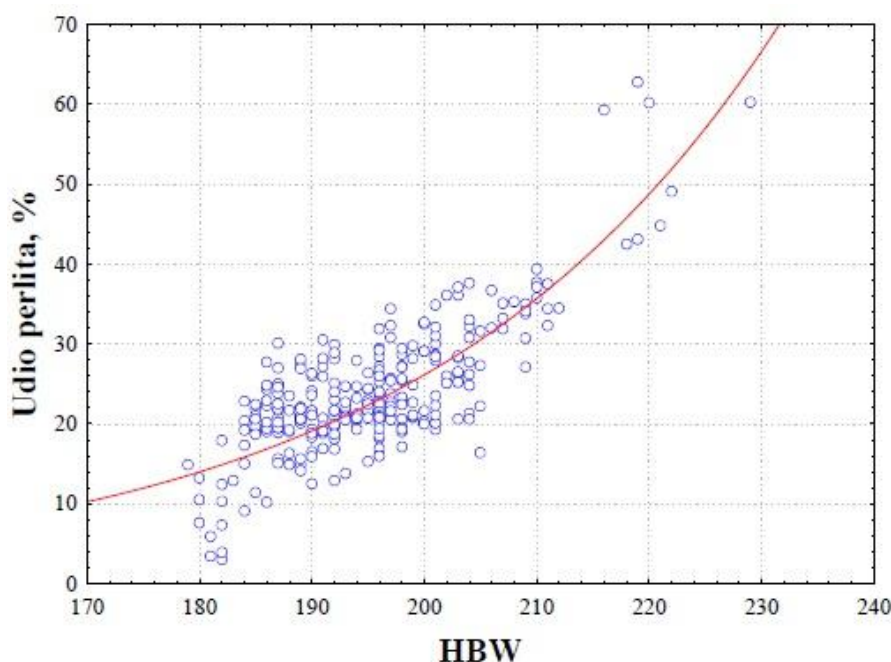
Slika 20. Utjecaj broja nodula u feritnom nodularnom lijevu na udarni rad loma [2]

2.4.6. Utjecaj udjela ferita i perlita

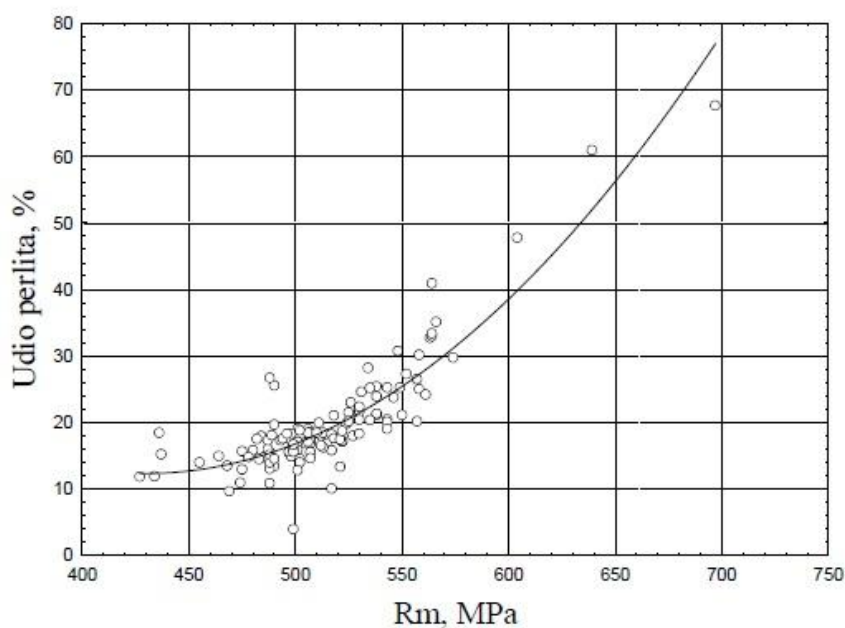
Udio i distribucija ferita i perlita u metalnoj osnovi ima vrlo značajan utjecaj na mehanička svojstva nodularnog lijeva.

Feritni nodularni lijev ima relativno visoko izduženje i udarnu žilavost te osrednju vlačnu čvrstoću i tvrdoću.

Perlitni nodularni lijev ima visoku vlačnu čvrstoću i tvrdoću te nisko izduženje i udarnu žilavost. Perlit je eutektoidna smjesa ferita i cementita i samim tim ima povećanu čvrstoću u odnosu na ferit, zbog čega je kod perlitnog nodularnog lijeva prisutan transkristalni krhki lom koji slijedi određene kristalne ravnine u pojedinim kristalnim zrnima. Utjecaj sadržaja perlita u metalnoj osnovi na tvrdoću i vlačnu čvrstoću nodularnog lijeva prikazan je na slikama 21 i 22. Može se vidjeti da tvrdoća i vlačna čvrstoća nodularnog lijeva rastu s porastom udjela perlita u metalnoj osnovi, što upućuje da su udarna žilavost i tvrdoća, odnosno vlačna čvrstoća obrnuto proporcionalne veličine.



Slika 21. Utjecaj udjela perlita u mikrostrukтури na tvrdoću nodularnog lijeva [2]



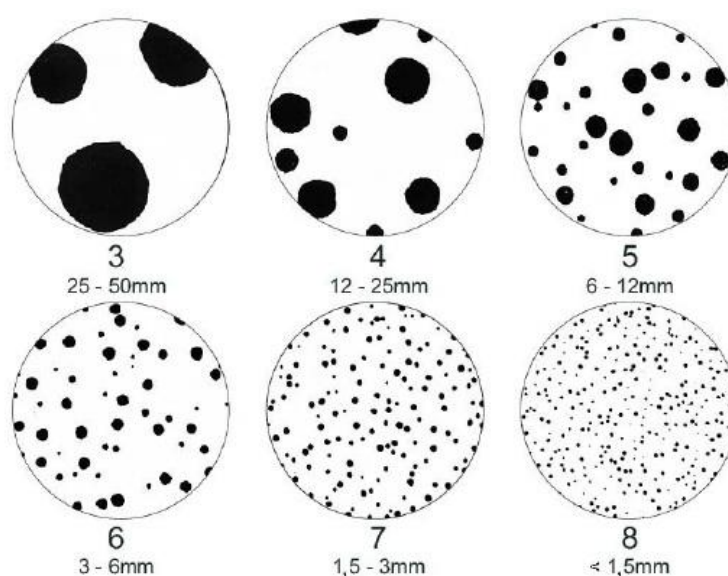
Slika 22. Utjecaj udjela perlita u mikrostrukтури na vlačnu čvrstoću nodularnog lijeva [2]

2.5. Mikrostruktura nodularnog lijeva

Nodularni lijev je legura približno eutektičkog sastava. Eutektik koji nastaje prilikom skrućivanja taljevine može biti stabilan ili metastabilan. Kod stabilne kristalizacije nastaju grafit i austenit, a kod metastabilne cementit (Fe_3C) i austenit. Postoji i treća mogućnost miješane strukture austenita, grafita i cementita.

Brušenjem, poliranjem i nagrizanjem površine uzoraka nodularnog lijeva te promatranjem takvog uzorka pod mikroskopom, utvrđujemo njegovu mikrostrukturu.

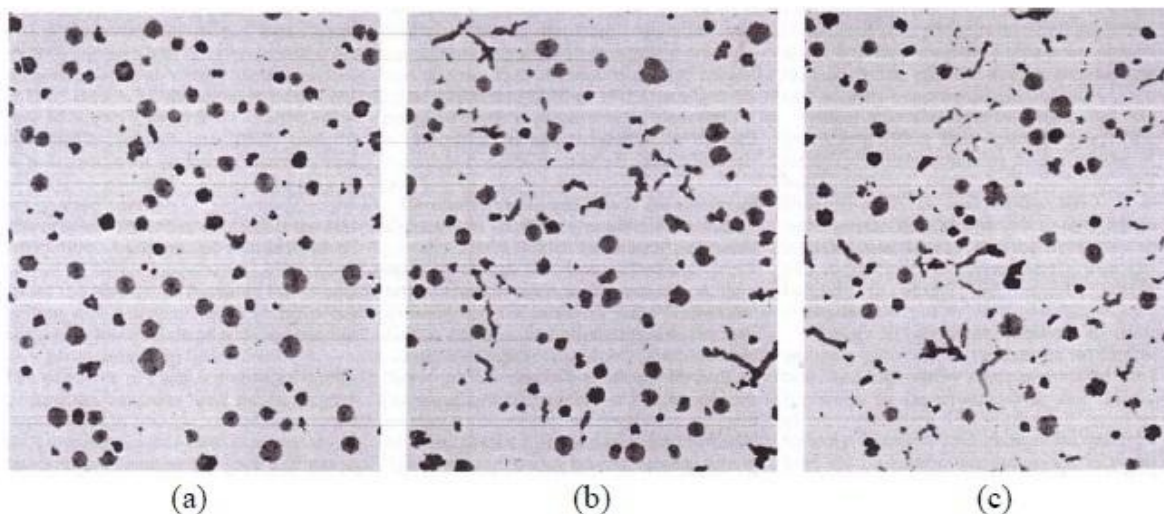
Nakon brušenja i poliranja, pod mikroskopom su vidljive nakupine grafita. Količina i oblik grafita određuju se tijekom skrućivanja i na njih se ne može utjecati naknadnom toplinskom obradom. Sva specifična mehanička svojstva nodularnog lijeva posljedica su pojave grafita u obliku kuglica, koje su više ili manje pravilnog oblika. Ista norma koja propisuje i klasifikaciju oblika grafita (HRN EN ISO 945:2009) propisuje i normirane veličine grafitnih nodula u nodularnom lijevu uz povećanje od 100 puta, pri čemu se promatraju najveće nodule u slici.



Slika 23. Normirane veličine grafitnih nodula (grafit oblika VI.) u nodularnom lijevu [3]

Nodularnost je volumni udio kuglastih nakupina grafita prema ukupnom broju grafitnih nakupina. Cilj je proizvesti lijev sa što većom modularnošću, obično iznad 90%, jer mehanička svojstva izrazito ovise o pravilnosti kuglica grafita [13].

Slika 24 prikazuje fotografije mikrostrukture triju nodularnih lijevova kod kojih se pojavljuje različita nodularnost.

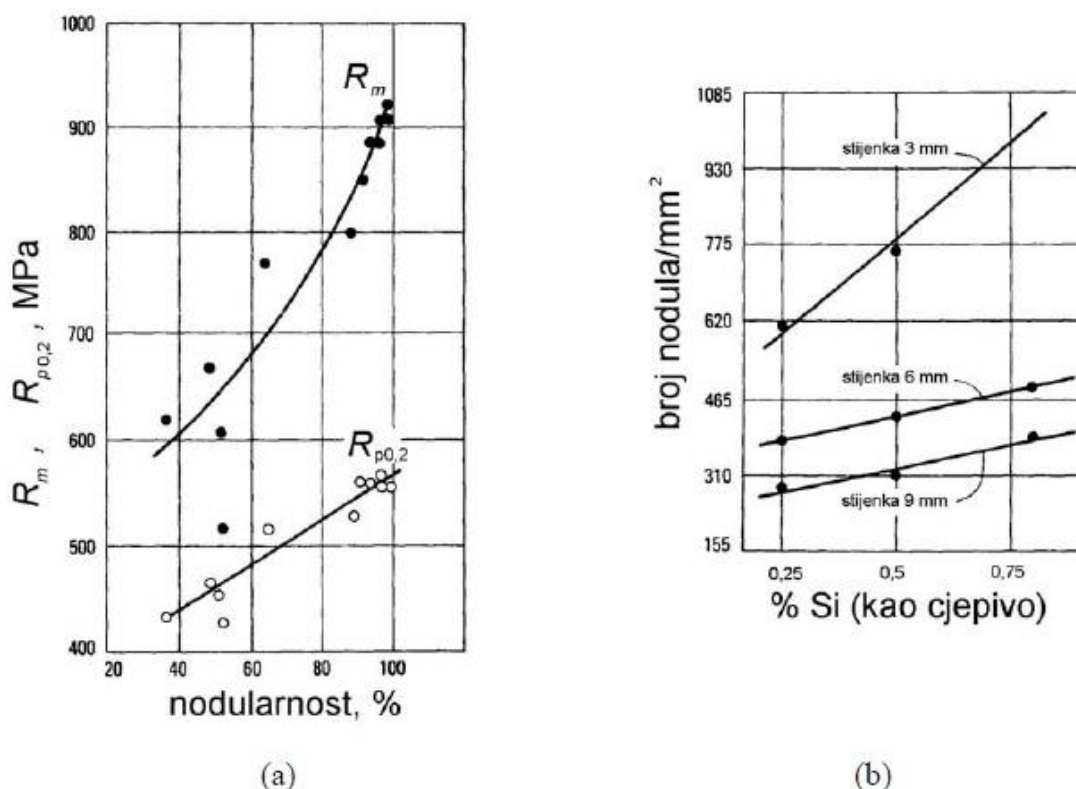


Slika 24. Mikrostruktura nodularnog lijeva različitih nodularnosti: (a) 90%, (b) 80%, (c) 50% [13]

Vlačna čvrstoća i dinamička izdržljivost izrazito opadaju s porastom udjela nekuglastih oblika grafita, dok se granica razvlačenja ne mijenja tako drastično. Slika 25. (a) prikazuje dijagramom ove pojave. Oblik nekuglastog grafita je važan jer tanki listići grafita s oštrim rubovima uzrokuju značajan pad vlačne čvrstoće. Smanjena nodularnost utječe i na modul elastičnosti, snižava žilavost, povećava sposobnost prigušenja vibracija, povećava toplinsku vodljivost i smanjuje električni otpor.

Prilikom proizvodnje odljevaka od nodularnog lijeva taljevina se, osim obrade nodulatorima, cijepi. Kod većine vrsta nodularnog lijeva pojava metastabilnih eutektičkih karbida u mikrostrukтури je nepoželjna, osim u slučaju da se zahtijeva povećana otpornost na trošenje ili abraziju. Cijepljenjem se potiče stabilno skrućivanje, povećava se broj nodula i poboljšava nodularnost [14]. Osim toga, povećanje broja nodula u lijevu otežava nastajanje karbida i potiče stvaranje ferita te je tako opasnost od nastanka tvrdih i krhkih odljevaka manja. Time odljevci imaju ujednačenu vlačnu čvrstoću, istezljivost, tvrdoću i obradivost odvajanjem čestica te ujednačena svojstva po različitim presjecima istog odljevka. Učinak cijepljenja je daleko veći nego što bi se moglo pripisati promijenjenom kemijskom sastavu taljevine nakon cijepljenja. Cijepljenjem se stvaraju dodatni centri za nukleaciju i rast grafita. Učinak cijepljenja je najveći neposredno nakon dodavanja cjepiva i opada s

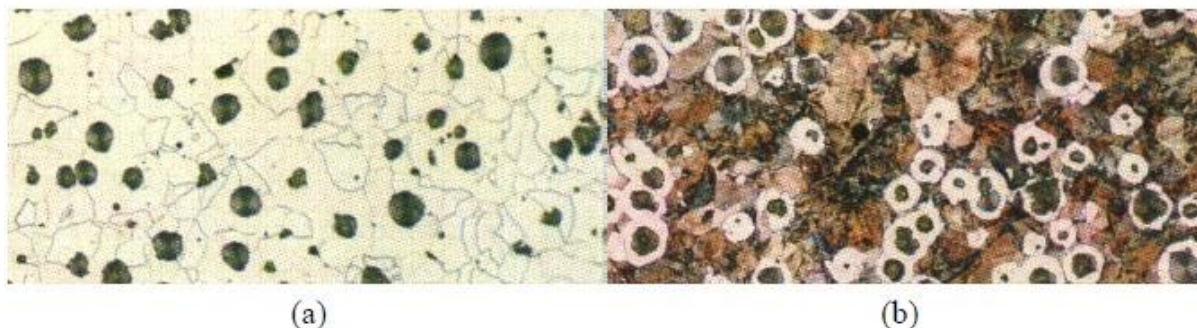
vremenom. Brzina opadanja učinka cijepljenja ovisi o brojnim čimbenicima, a najvažniji su kemijski sastav cjepiva, sastav taljevine u koju se dodaje cjepivo, temperatura taljevine te brzina hlađenja između likvidusa i solidusa [12]. Slika 25. (b) prikazuje utjecaj udjela silicija, koji je dodan u taljevinu kao cjepivo, na broj nodula po jedinici površine za tri odljevka različite debljine stijenke. Pri porastu udjela grafita u mikrostrukturi dolazi do blagog pada vlačne čvrstoće, istezljivosti i gustoće nodularnog lijeva.



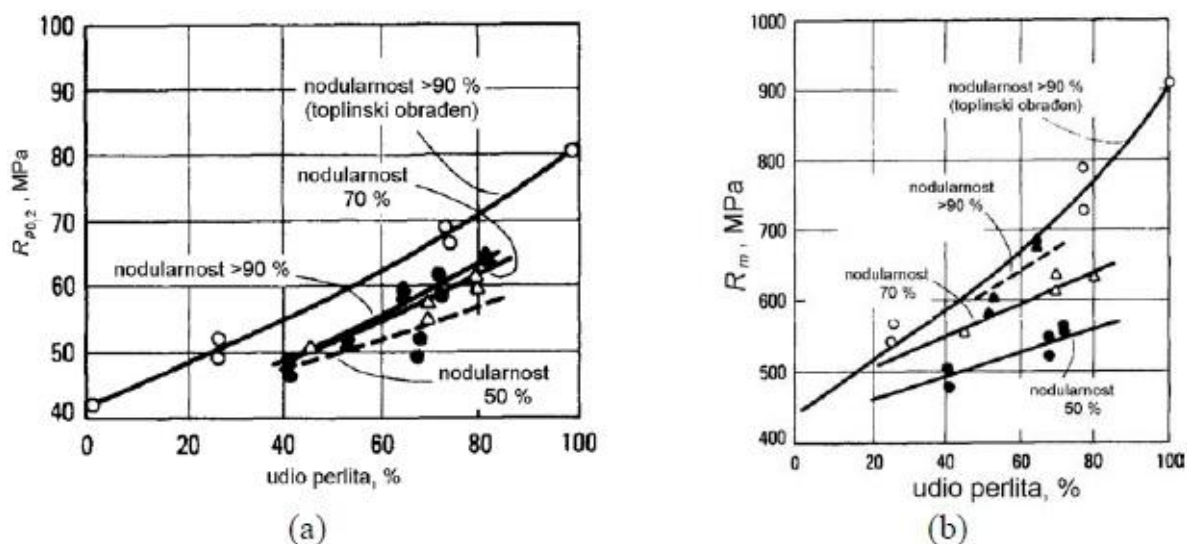
Slika 25. (a) utjecaj nodularnost na mehanička svojstva nodularnog lijeva, (b) utjecaj udjela silicija (cjepivo) na broj nodula/mm² za tri debljine stijenke [13]

Metalna osnova nodularnog lijeva postaje vidljiva nakon što se izbrušeni i polirani uzorak nagriže nitalom. Željezna matrica može biti feritna, perlitna, feritno-perlitna ili austenitna. Austenitni nodularni lijev se koristi prije svega u uvjetima tražene otpornosti na visoke temperature, otpornosti na koroziju i trošenje [15]. Slika 26. prikazuje mikrostrukture feritnog (a) i perlitnog (b) nodularnog liejva, pri povećanju 100 puta, obje nagrižene 4% nitalom. U lijevanom stanju nodularni ljevovi imaju najčešće kombinaciju feritno-perlitne željezne matrice. Povećanjem udjela feritne matrice lijev ima nižu vlačnu čvrstoću, višu istezljivost, nižu žilavost i višu prijelaznu temperaturu žilavo-krhko. Slika 27 prikazuje promjenu konvencionalne granice

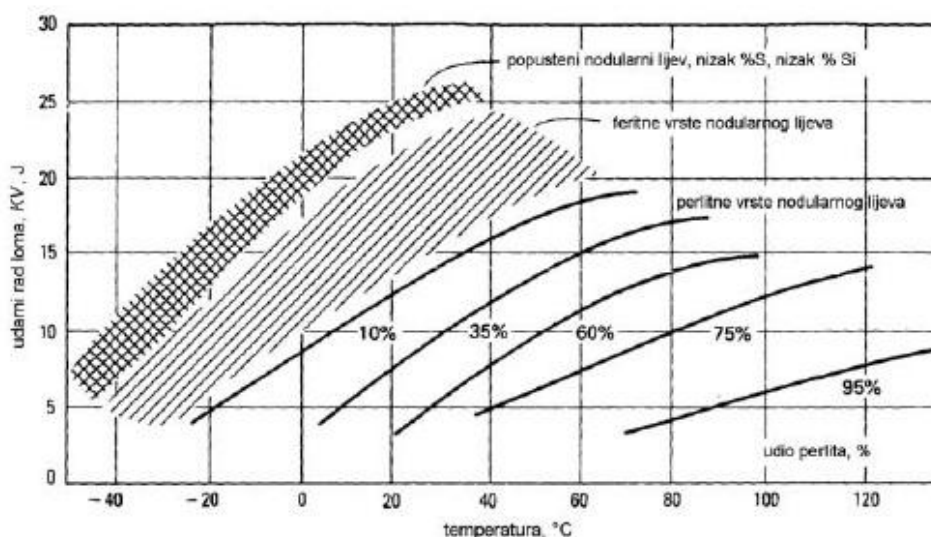
razvlačenja (a) i vlačne čvrstoće (b) s promjenom udjela perlita za različite nodularnosti nodularnog lijeva. Slika 28 prikazuje promjenu vrijednosti udarnog rada loma pri promjeni temperature ispitivanja za različite vrste nodularnog lijeva.



Slika 26. Mikrostruktura feritnog (a) i perlitnog (b) nodularnog lijeva, povećanje 100x, nagriženo 4% nitalom [16]



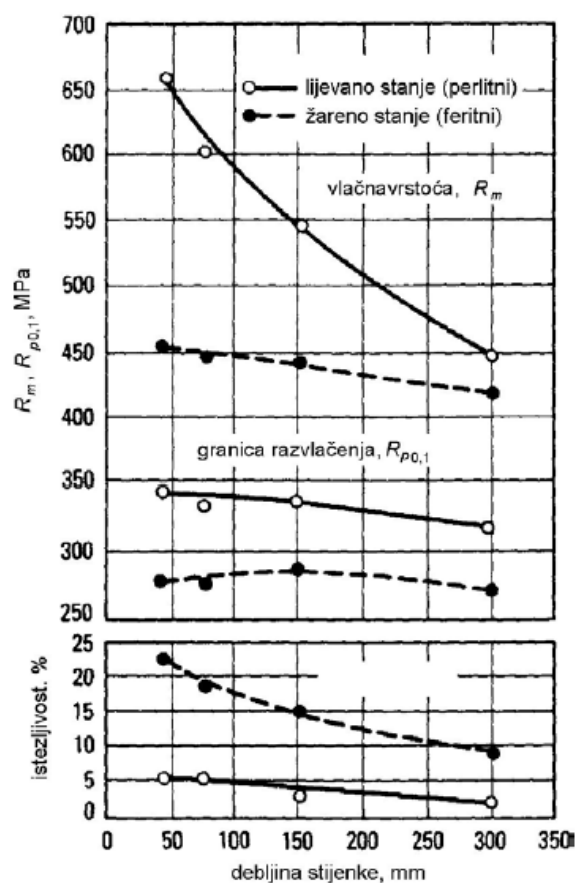
Slika 27. Konvecionalna granica razvlačenja i vlačna čvrstoća nodularnog lijeva pri različitim udjelima perlita i nodularnostima [13]



Slika 28. Udarni rad loma na različitim temperaturama za različite vrste nodularnog lijeva [13]

Na strukturu i svojstva nodularnog lijeva utječe i debljina stijenke odljevka. Kako se stjenka stanjuje, povećavaju se brzina kristalizacije i brzina hlađenja. Time se dobiva sitnozrnata mikrostruktura, ali se mogu pojaviti i karbidi koji povećavaju tvrdoću, smanjuju obradivost odvajanjem čestica i smanjuju žilavost odljevka. Stoga je kod tankostjenih odljevaka taljevinu potrebno pojačano cijepiti, i to što kasnije, kako bi se stvorio što veći broj nodula.

S povećanjem debljine stijenke smanjuje se broj nodula i sve je izraženija mikrosegregacija, nastale nodule su veće i smanjuje se udio ferita u lijevanom stanju. Kod posebno debelih stjenki dolazi do segregacije karbidotvoraca, kao što su krom, titan i vanadij, što uzrokuje smanjenje istezljivosti, žilavosti i čvrstoće i tek blago smanjenje granice razvlačenja. Slika 29 prikazuje promjenu mehaničkih svojstava nodularnog lijeva pri većim debljinama stijenke za perlitnu strukturu u lijevanom stanju i za feritnu strukturu za odljevak u žarenom stanju. [2]



Slika 29. Utjecaj debljine stijenke na mehanička svojstva nodularnog lijeva [13]

3. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj ovog rada je ispitati utjecaj debljine stijenke na mehanička svojstva nodularnog lijeva kvalitete EN GJS 400 - 15. Na odljevcima od nodularnog lijeva su provedena:

- metalografska ispitivanja,
- mehanička ispitivanja.

Izrada taljevine nodularnog lijeva i lijevanje uzoraka provedeno je u ljevaonici "Metalska industrija Varaždin" d.d. u Varaždinu, gdje su provedena i mehanička ispitivanja. Metalografska ispitivanja provedena su na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Primarna taljevina za proizvodnju nodularnog lijeva izrađena je u srednje - frekventnoj indukcijskoj peći kapaciteta 5,5 t.



Slika 30. Srednje - frekventna indukcijska peć

Ispitivane su dvije primarne taljevine za proizvodnju nodularnog lijeva s različitim CE. Sastavi za obje taljevine prikazani su u tablici 4 i 5. Prije proizvodnje nodularnog lijeva napravljena je toplinska analiza pomoću Quick – cup čašica te je uzet uzorak taljevine za određivanje kemijskog sastava.



Slika 31. Toplinska analiza Quick – cup čašicom

Tablica 4 prikazuje sastav primarne taljevine nodularnog lijeva višeg CE

Tablica 4. Sastav primarne taljevine višeg CE za proizvodnju nodularnog lijeva

ULAZNE SIROVINE	%	MASA (kg)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	S (%)
SSŽ SOREL	0%	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,000%
SSŽ SPECIJALNO	46%	2668	2,02%	0,32%	0,04%	0,005%
ČELIK	18%	1044	0,05%	0,05%	0,16%	0,001%
POVRATNI MATERIJAL	34%	1972	1,21%	0,92%	0,09%	0,004%
FeSi	0,50%	29	0,00%	0,30%	0,00%	0,000%
KARBURIT	0,30%	17	0,26%	0,00%	0,00%	0,000%
KARBOSIL SiC	0,88%	51	0,16%	0,44%	0,00%	0,000%
UKUPNO	99,7%	5781	3,70%	2,03%	0,28%	0,010%

Tablica 5 prikazuje sastav primarne taljevine nižeg CE.

Tablica 5. Sastav primarne taline nižeg CE za proizvodnju nodularnog lijeva

		OČEKIVANI KEMIJSKI SASTAV				
ULAZNE SIROVINE	%	MASA (kg)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	S (%)
SSŽ SOREL	26%	1468	1,04%	0,02%	0,00%	0,002%
SSŽ SPECIJALNO	26%	1454	1,07%	0,14%	0,01%	0,003%
ČELIK	9%	512	0,01%	0,00%	0,07%	0,001%
POVRATNI MATERIJAL	41%	2344	1,40%	1,07%	0,10%	0,006%
FeSi	0,3%	15	0,00%	0,19%	0,00%	0,000%
KARBURIT	0,1%	8	0,12%	0,00%	0,00%	0,000%
KARBOSIL SiC	0,0%	0	0,00%	0,00%	0,00%	0,000%
UKUPNO	102%	5801	3,63%	1,42%	0,19%	0,012%

3.1. Proizvodnja nodularnog lijeva

Nodularni lijev je proizveden Tundish postupkom u loncu kapaciteta 2200 kg.

Primarna taljevina s višim CE nodulirana je nodulatorom trgovačkog naziva ELMAG[®] 5800 s udjelom 1,3% te cijepljena cjepivom trgovačkog naziva BARINOC[®] s udjelom 0,2%.

Primarna taljevina nižeg CE nodulirana je s nodulatorom trgovačkog naziva ELMAG[®] 5800 s udjelom od 1,4% te je cijepljena cjepivom trgovačkog naziva BARINOC[®] s udjelom od 0,4%.

U tablici 6. je prikazan kemijski sastav nodulatora i cjepiva.

Tablica 6. Kemijski sastav nodulatora i cjepiva

Naziv sirovine	Namjena	Si %	Mg %	Ca %	Al %	Ce %	RE %	Ba %	Fe %
ELMAG [®] 5800	nodulator	46,10	5,93		0,80	1,05	1,01		ostalo
BARINOC [®]	cjepivo	75,50		1,61	1,22			2,34	ostalo

Tundish postupak proizvodnje nodularnog lijeva je suvremena bezdimna tehnologija koja se temelji na principu prelijevanja taljevine s niskim sadržajem sumpora preko nodulatora spremijenog u zatvorenom lijevačkom loncu, a primjenjuje se pri ručnom ukalupljivanju. Tundish postupak omogućava: visoki stupanj nodulacije, manju potrošnju nodulatora (oko 1,5 %), manji pad temperature, nema isijavanja i blještavosti za vrijeme obavljanja nodulacije, nema onečišćenja radne okoline, veću produktivnost te ekonomičnost za pojedinačnu i maloserijsku proizvodnju odljevaka. [17]

Slika 32 prikazuje ulijevanje primarne taljevine u lonac za proizvodnju nodularnog lijeva, a slika 33 prikazuje lijevanje taljevine u kalup.



Slika 32. Ulijevanje primarne taljevine u lonac

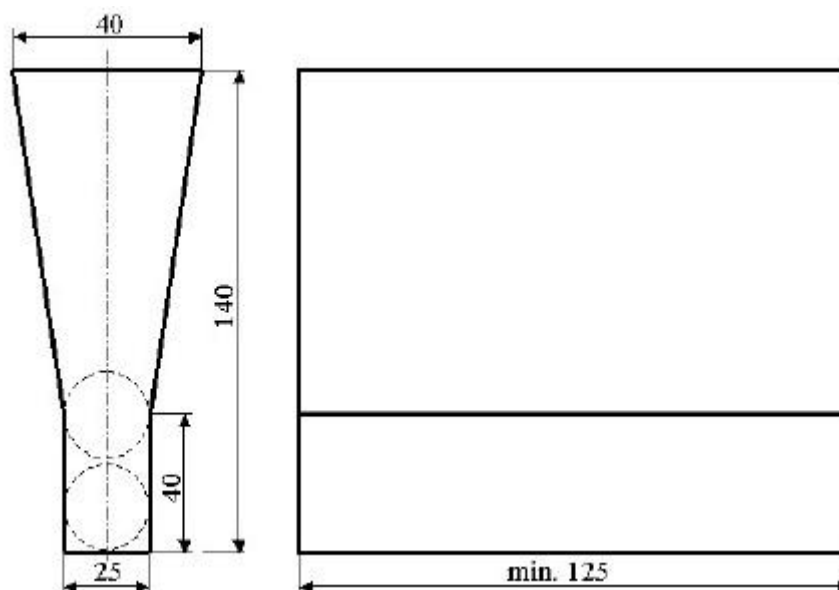


Slika 33. Lijevanje taljevine u kalupe

Prije ulijevanja u kalup napravljena je toplinska analiza pomoću Quick – cup čašica te je uzet uzorak taljevine za određivanje kemijskog sastava.

Temperatura u loncu je bila 1480 °C, dok je temperatura lijevanja u kalupe bila oko 1380 °C.

Kao ispitni uzorci odlivene su Y-probe debljine stijenke 25 mm, 50 mm i 75 mm. U jednom kalupu izliveno su dvije Y-probe od iste taljevine. Oblik, dimenzije, vrsta kalupa, način ulijevanja i hlađenja Y-probe propisani su normom HRN EN 1563. Slika 34 prikazuje propisani oblik i dimenzije YII- probe.



Slika 34. YII - proba prema normi HRN EN 1563

Kalupi za lijevanje Y - proba su izrađeni CO₂ postupkom. Kalupna mješavina sastoji se od kvarcnog pijeska i anorganskog veziva, vodenog stakla (natrijev silikat), a priprema se u mješalici ili ručno. Nakon popunjavanja kalupnika ili jezgrenika, mješavina očvršćuje propuhivanjem plinom, ugljičnim dioksidom (CO₂). Iz tog razloga često se ovaj postupak izrade kalupa ili jezgri naziva CO₂ postupak. Postupak je postao značajan za izradu jezgri, zbog brzog ciklusa izrade (10-25 s) i ekološke prihvatljivosti. U mješavinu se mogu dodati dodaci koji smanjuju upijanje vlage prilikom skladištenja kalupa i jezgri, te dodaci koji poboljšavaju razrušljivost. Nedostaci postupka su slaba razrušljivost kalupa i komplicirana regeneracija starog pijeska. [18]

3.2. Ispitivanje kemijskog sastava

Kemijski sastav ispitan je u ljevaonici Metalska Industrija Varaždin. Proba za određivanje kemijskog sastava lijeva se u bakrenu kokilu, zbog bržeg odvođenja topline. Kemijski sastav taljevine određen je spektrografskom analizom tako da se odlije ispitni uzorak u obliku pločice što se može vidjeti na slici 36. Ako kemijski sastav zadovoljava potrebne uvjete može se započeti s lijevanjem u kalup.

Na slici 35 prikazan kvantometar za ispitivanje kemijskog sastava.



Slika 35. Uređaj za ispitivanje kemijskog sastava



Slika 36. Spektrografska pločica

Kemijski sastav je određen za obje primarne taljevine i za obje taljevine nodularnog lijeva.

3.3 Toplinska analiza

Toplinska analiza, tj. snimanje krivulja hlađenja pripremljenih taljevina nodularnog lijeva provedena je sustavom za toplinsku analizu ATAS u ljevaonici Metalska Industrija Varaždin. U ovom radu je pomoću toplinske analize kontroliran CE u primarnoj taljevini i nodularnom lijevu. Prethodno je određen iznos koji treba biti postignut za svaku taljevinu kako bi se utvrdilo da li i kako različiti CE utječe na mikrostrukturu i mehanička svojstva odljevaka s obzirom na promjenu debljine stijenke. Općenito se niži CE koristi za lijevanje debelostjenih odljevaka dok se viši CE koristi za lijevanje tankostjenih odljevaka, kako uslijed većeg CE i sporijih brzina hlađenja kod debelostjenih odljevaka ne bi došlo do flotacije i degeneracije grafita.

3.4. Metalografska ispitivanja

Metalografska ispitivanja svjetlosnim mikroskopom izvršena su u Laboratoriju za materijalografska ispitivanja, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Pripremljeno je 6 uzoraka, po jedan iz svake Y - probe strojnom obradom iz donjeg najužeg dijela.

3.4.1. Priprema uzoraka

Prije ispitivanja svjetlosnim mikroskopom izdvojeni uzorci pripremljeni su standardnim postupkom.

Dimenzije uzoraka: $\Phi 20 \times 10$ mm.



Slika 37. Izdvojeni uzorak za ispitivanje

Standardni postupak pripreme uzoraka:

- brušenje
- poliranje
- nagrizanje (nital 3%).

Brušenje uzoraka vršeno je na stroju „Phoenix Alpha – grinder/polisher“ proizvođača Buehler (slika 38). Brušenje je izvedeno voodootpornim brusnim papirima s brusnim zrnima od silicijevih karbida u četiri koraka s izmjenama papira:

- P320
- P600
- P1200
- P2400.

Nakon svake izmjene papira, uzorci su zakretani za 90° radi uklanjanja tragova prethodnog brušenja. Brušenje je vršeno pri 300 okr/min, a kao sredstvo za hlađenje korištena je voda.

Slika 38 prikazuje stroj za brušenje uzoraka.



Slika 38. Uređaj za brušenje uzoraka

Prije poliranja, uzorci su očišćeni u ultrazvučnoj čistilici (slika 39).



Slika 39. Ultrazvučna čistilica

Poliranje ispitnih uzoraka obavljeno je uređajem „Struers DAP-V“. Korištena je tkanina „MD – MOL“ i dijamantne paste proizvođača Buehler. Poliranje je vršeno pri 150 okr/min, a kao sredstvo za hlađenje korištena je tekućina „DP – Lubricant Red“.

Slika 40 prikazuje uređaj za poliranje uzoraka.



Slika 40. Uređaj za poliranje uzoraka

3.4.2. Ispitivanje mikroskopom

Za metalografska ispitivanja uzoraka korišten je svjetlosni mikroskop „Olympus 6X S1“ (slika 41) s mogućnošću povećanja od 50x do 1000x te je korišten program IMAGE J.



Slika 41. Svjetlosni mikroskop

Mikroskop je opremljen kamerom i povezan s računalom (slika 42).

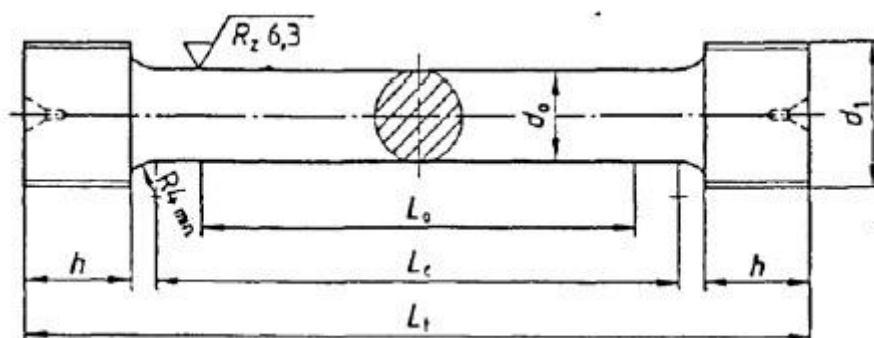


Slika 42. Računalo povezano s mikroskopom

3.5. Ispitivanje mehaničkih svojstava

Mehanička svojstva ispitana su u ljevaonici Metalska Industrija Varaždin u Varaždinu.

Norma HRN EN 1563 propisuje i način izuzimanja uzoraka, odnosno epruveta napravljene strojnom obradom za statičko vlačno ispitivanje iz odlivene Y-probe. Slika 34 također prikazuje mjesto izuzimanja epruveta crtkanom crtom, a za potrebe ovog istraživanja korištena je slikom prikazana donja epruveta. Epruvete su kružnog poprečnog presjeka, oblika i dimenzija B 14 x 70, prema DIN 50125. Slika 41 prikazuje epruvetu za statičko vlačno ispitivanje B 14 x 70. Prema normi, početni promjer $d = 14$ mm, a početna mjerna duljina $L = 70$ mm. Ostale dimenzije prema normi su: M20, $h = \min. 17$ mm, $L = \min. 84$ mm, $L = \min. 125$ mm.



Slika 43. Epruveta za statičko vlačno ispitivanje B 14 x 70

Za svaku je taljevinu te propisanu debljinu stijenke pripremljena po jedna normom propisana epruveta za statičko vlačno ispitivanje te su na univerzalnoj kidalici određena sljedeća mehanička svojstva: vlačna čvrstoća R_m , konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0,2}$ i istezljivost A_5 . Statičko vlačno ispitivanje provedeno je na kidalici vrste ZD-20, njemačkog proizvođača "Fritz Heckert", proizvedenoj 1966. godine.

Na slici 44 je prikazan uređaj za ispitivanje mehaničkih svojstava.



Slika 44. Uređaj za ispitivanje mehaničkih svojstava

3.6. Ispitivanje tvrdoće

Nakon provedenog statičkog vlačnog ispitivanja, poprečno su odrezane glave epruveta, kako bi se dobili valjčići, na kojima je ispitana tvrdoća metodom Brinell, prema normi DIN 50 351. U svaki je uzorak utisnut redni broj njegove taljevine. Ispitivanje tvrdoće također je obavljeno u mehaničkom laboratoriju "Metalske industrije Varaždin" d.d. Tvrdomjer vrste HPO 250, njemačkog proizvođača "Fritz Heckert", proizveden 1988. godine, korišten je za ispitivanje tvrdoće. Na svakom je uzorku tvrdoća izmjerena tri puta te je određena srednja vrijednost.

4. REZULTATI I RASPRAVA

4.1. Kemijski sastav primarne taljevine

U tablici 7 prikazan je kemijski sastav primarne taljevine nodularnog lijeva s višim CE.

Tablica 7. Kemijski sastav primarne taljevine nodularnog lijeva s višim CE

C, %	Si, %	Mn, %	S, %	Al, %	P, %	Ni, %	Cr, %	Cu, %	Mo, %
3,6669	2,0476	0,3069	0,0187	0,0018	0,0372	0,0232	0,0265	0,0461	0,0023

U tablici 8 prikazan je kemijski sastav primarne taljevine nodularnog lijeva s nižim CE.

Tablica 8. Kemijski sastav primarne taljevine nodularnog lijeva s nižim CE

C, %	Si, %	Mn, %	S, %	Al, %	P, %	Ni, %	Cr, %	Cu, %	Mo, %
3,5175	1,3250	0,1963	0,0119	0,0017	0,0322	0,0250	0,0263	0,0389	0,0028

4.2. Kemijski sastav noduliranog i cijepljenog nodularnog lijeva

U tablici 9 su prikazani rezultati kemijskog sastava nodularnog lijeva s višim CE

Tablica 9. Kemijski sastav noduliranog nodularnog lijeva s višim CE

C, %	Si, %	Mn, %	S, %	Al, %	P, %	Ni, %	Cr, %	Cu, %	Mo, %
3,4584	2,7637	0,2998	0,0118	0,0075	0,0354	0,0222	0,0260	0,0433	0,0016

U tablici 10 su prikazni rezultati kemijskog sastava nodularnog lijeva niskougliječnog ekvivalenta.

Tablica 10. Kemijski sastav noduliranog nodularnog lijeva s nižim CE

C, %	Si, %	Mn, %	S, %	Al, %	P, %	Ni, %	Cr, %	Cu, %	Mo, %
3,3811	2,1624	0,1996	0,0106	0,0084	0,0337	0,0248	0,0263	0,0385	0,0027

U primarnoj taljevini i u taljevini nodularnog lijeva je postignut željeni sastav te sastav odgovara sastavu zadanom u normi. Vidljiv je porast silicija i aluminija u nodularnom lijevu za obje taljevine.

4.3. Rezultati toplinske analize

U tablici 11 su prikazani postignuti CE.

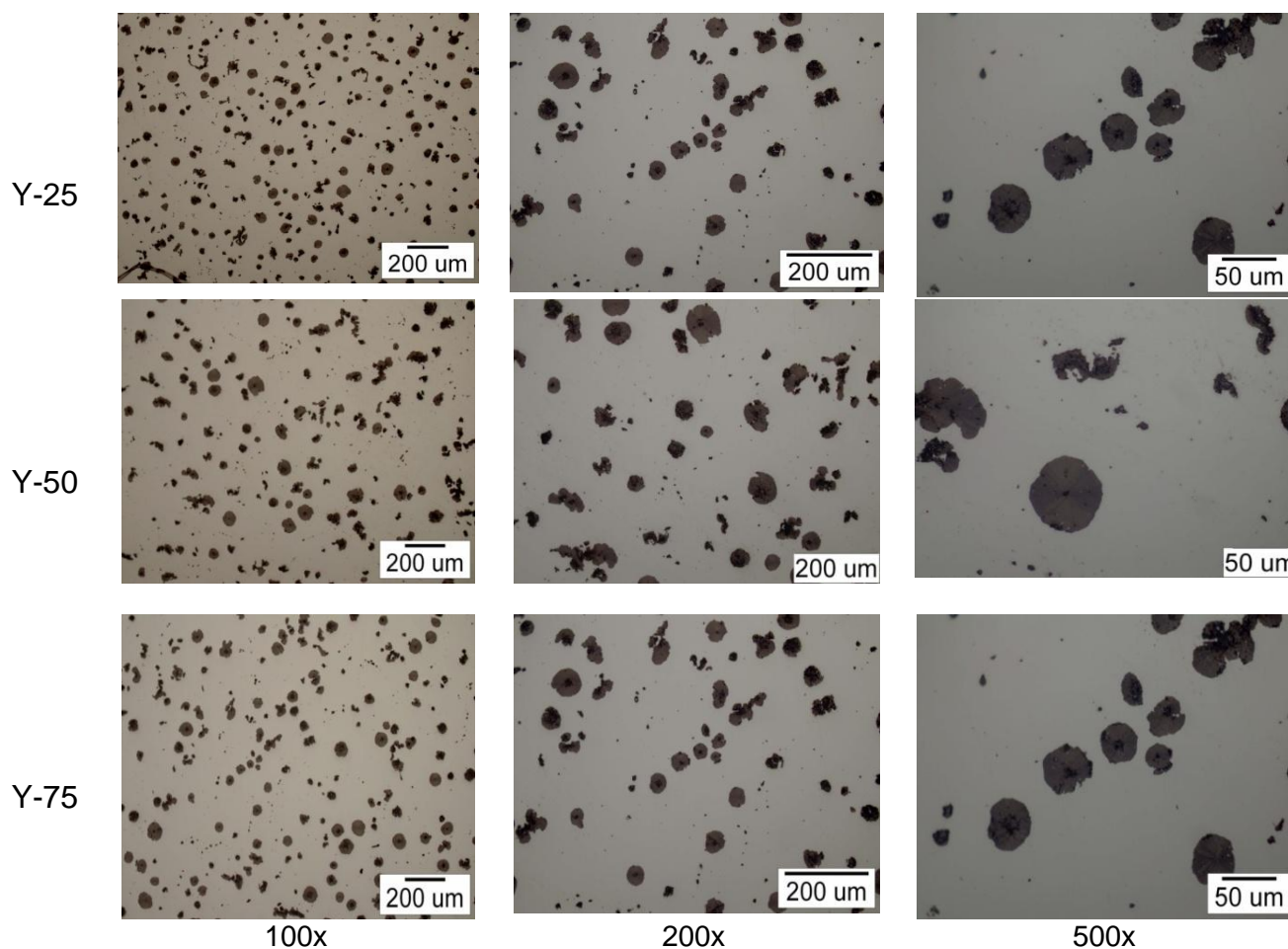
Tablica 11. Prikaz postignutih CE dobivenih toplinskom analizom

Taljevina	Iznos CE
Primarna viši CE	4,16
Nodularni lijev viši CE	4,27
Primarna niži CE	3,91
Nodularni lijev niži CE	4,01

Nakon provedenih toplinskih analiza ustanovljeno da je u svakoj taljevini postignut zahtjevani CE. Nakon nodularizacije i cijepjenja vidljiv je rast iznosa ugljičnog ekvivalenta.

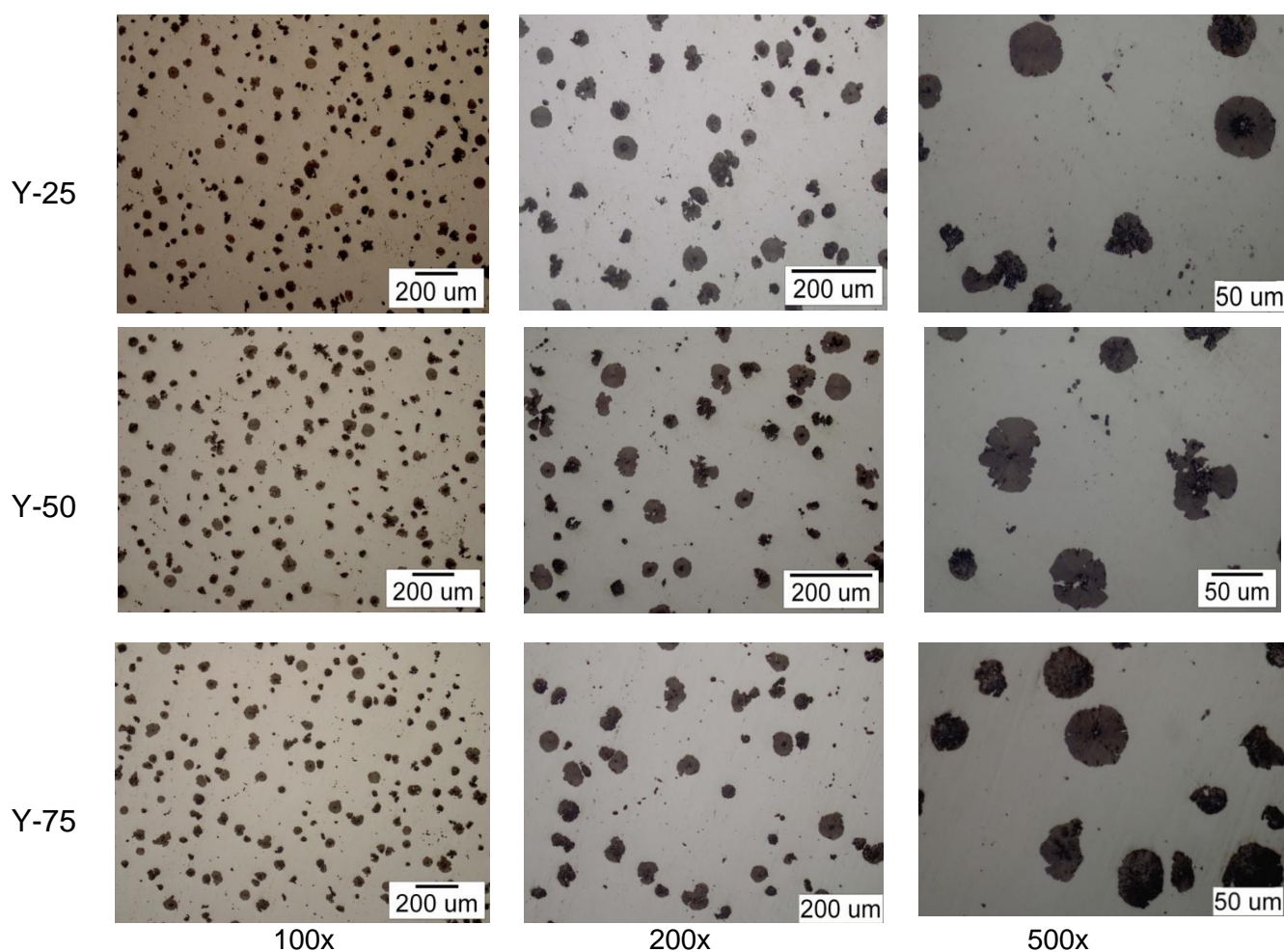
4.4. Rezultati metalografskih ispitivanja

Na slici 45 prikazane su mikrostrukture ispitane svjetlosnim mikroskopom s višim CE pri različitim povećanjima u nenagrizenom stanju.



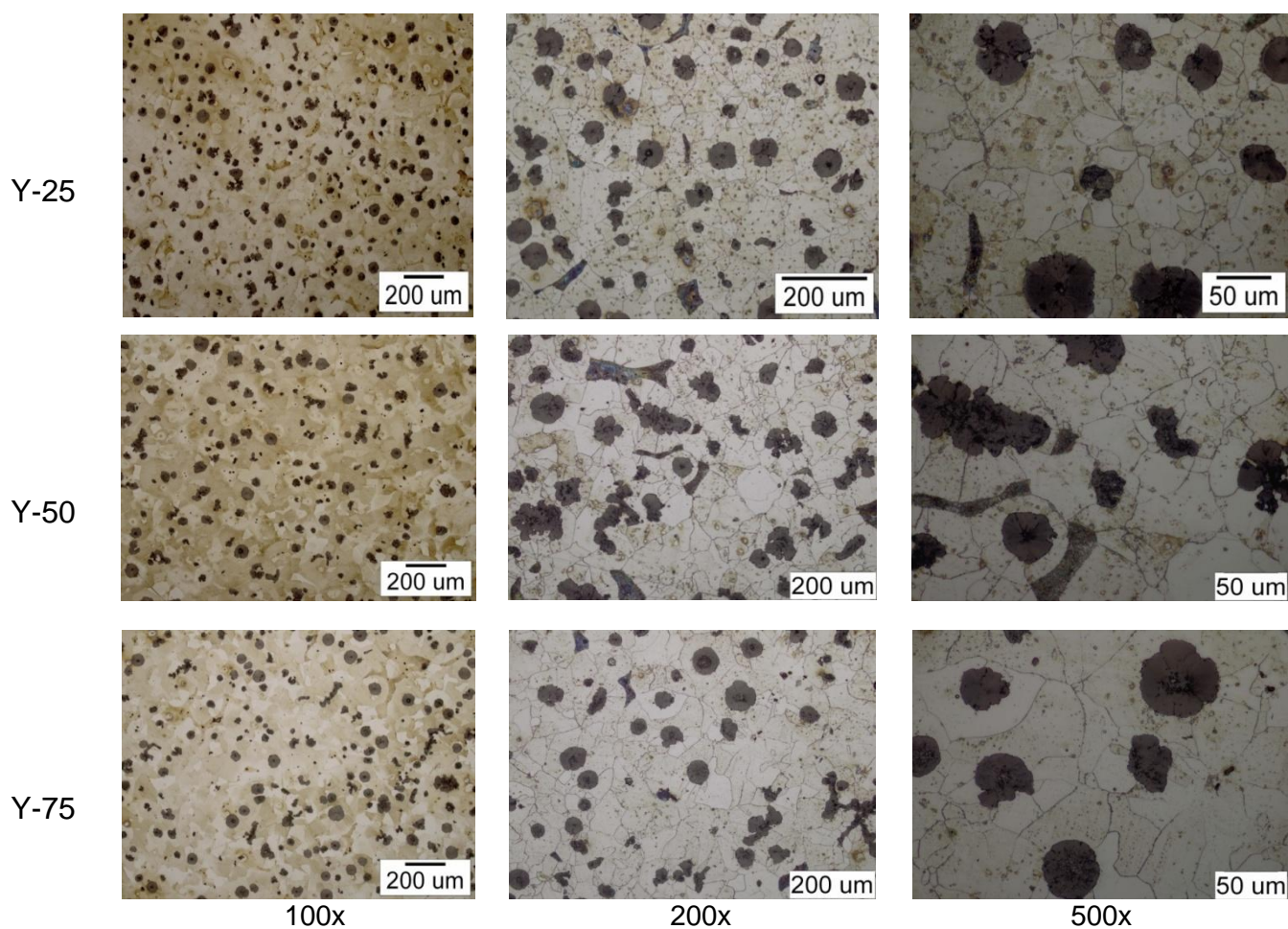
Slika 45. Mikrostrukture uzoraka od nodularnog lijeva različitih debljina stijenke s višim CE pri različitim povećanjima u nenagrizenom stanju

Na slici 46 prikazane su mikrostrukture ispitane svjetlosnim mikroskopom s nižim CE pri različitim povećanjima u nenagrizenom stanju.



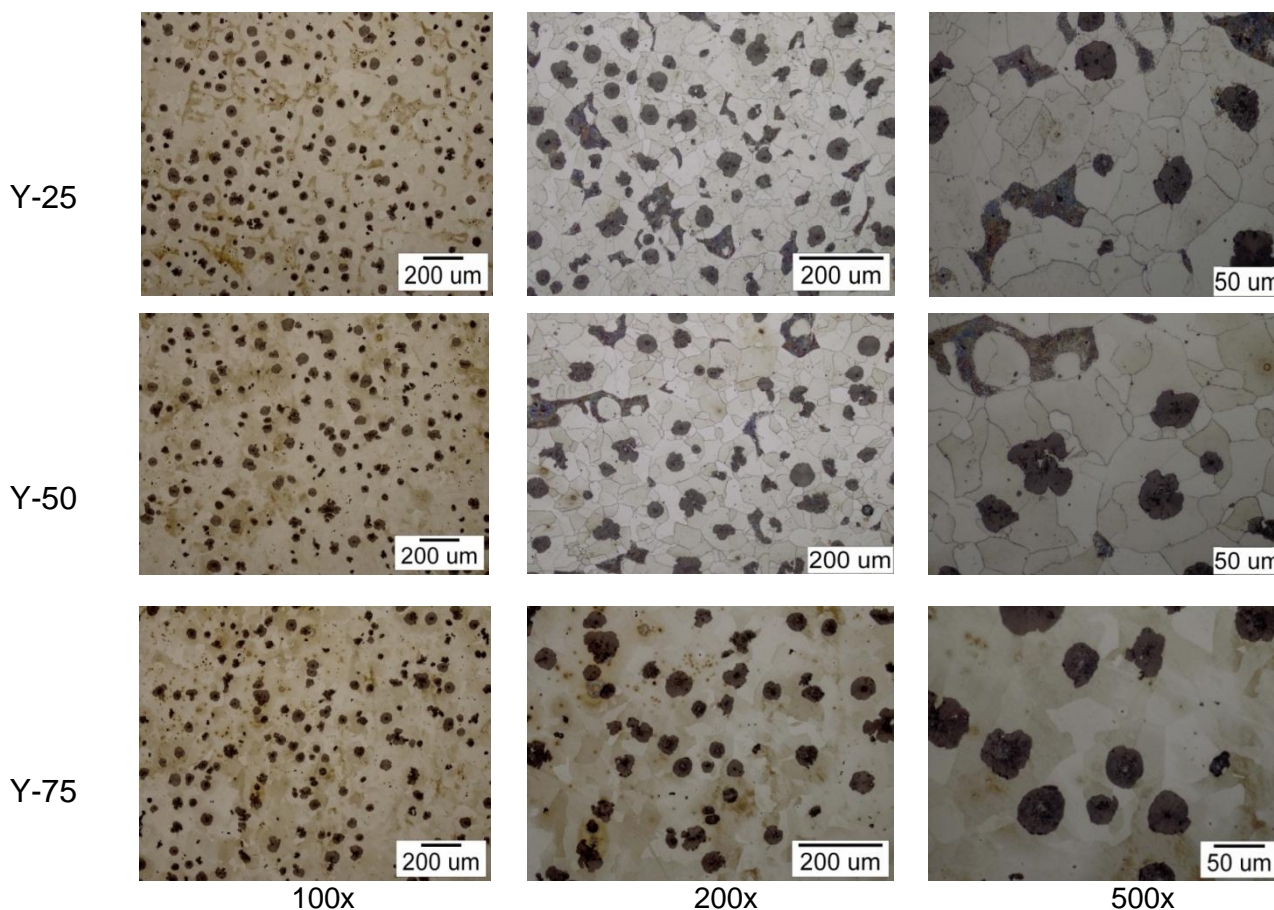
Slika 46. Mikrostrukture uzoraka od nodularnog lijeva različitih debljina stijenke s nižim CE pri različitim povećanjima u nenagrizenom stanju

Na slici 47 prikazane su mikrostrukture ispitane svjetlosnim mikroskopom s višim CE pri različitim povećanjima u nagrizenom stanju.



Slika 47. Mikrostrukture uzoraka od nodularnog lijeva različitih debljina stijenke s višim CE pri različitim povećanjima u nagrizenom stanju (nital 3%)

Na slici 48 prikazane su mikrostrukture ispitane svjetlosnim mikroskopom s nižim CE pri različitim povećanjima u nagrizenom stanju.



Slika 48. Mikrostrukture uzoraka od nodularnog lijeva različitih debljina stijenke s nižim CE pri različitim povećanjima u nagrizenom stanju (nital 3%)

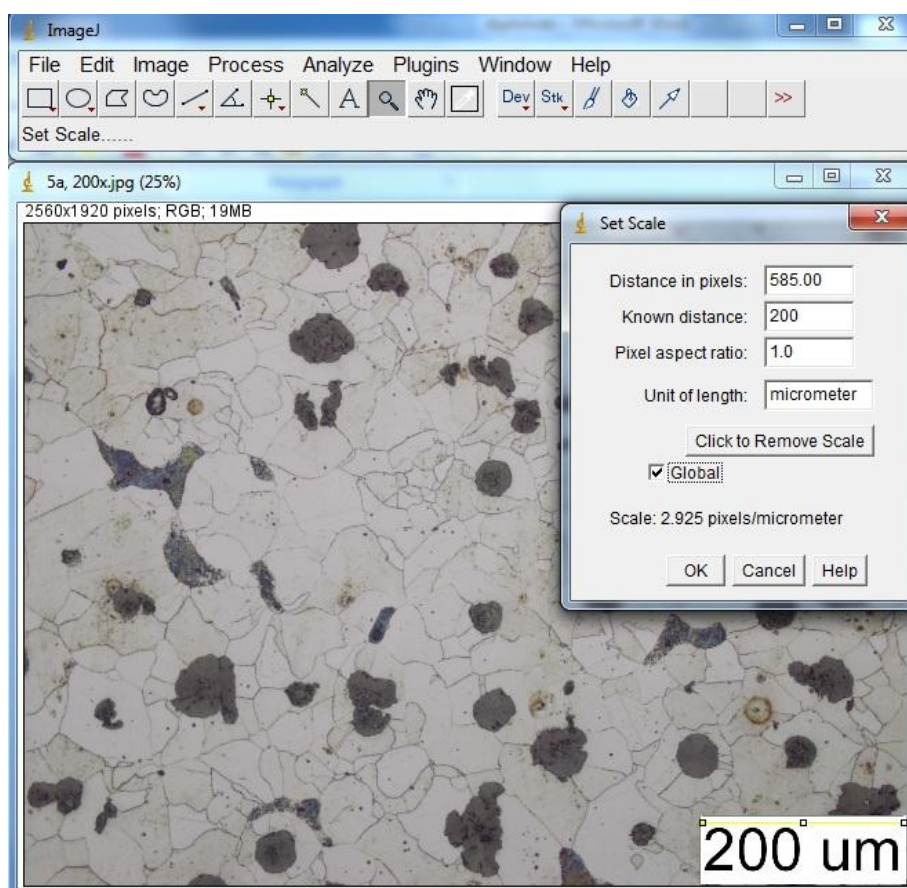
Pregledom mikrostrukture može se zaključiti kako promjena debljine stijenke utječe na broj i veličinu nodula. Povećanje debljine smanjuje se broj nodula ali nodule rastu. Vidljivo je i da je do degeneracije grafita došlo kod svih debljina stijenke.

Struktura je feritno – perlitna. Udio perlita nije izmjereno, ali prema podacima iz literature kreće se približno od 10 – 15 %.

4.5. Određivanje udjela grafita u nodularnom lijevu

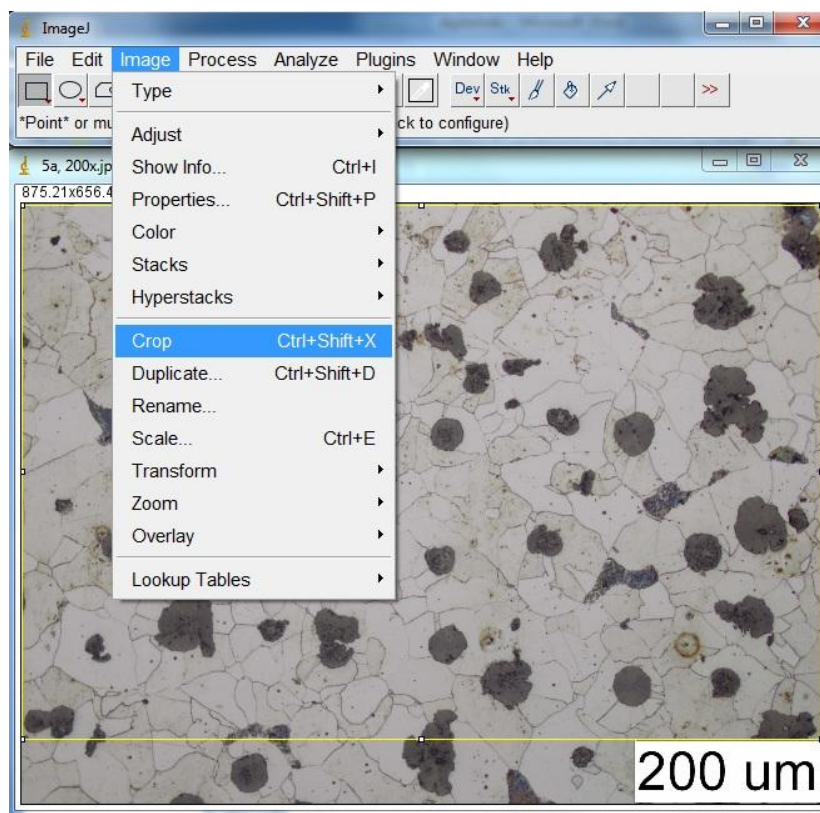
Kako bi se prikazao udio grafita u pojedinim presjecima koristi se navedeni program. Postupak obrađivanja slika je slijedeći:

1. Otvori se željenu sliku koju je potrebno kalibrirati, odnosno unijeti referentno mjerilo. Slika 49 prikazuje kalibriranje slike, odnosno unošenje mjerila.



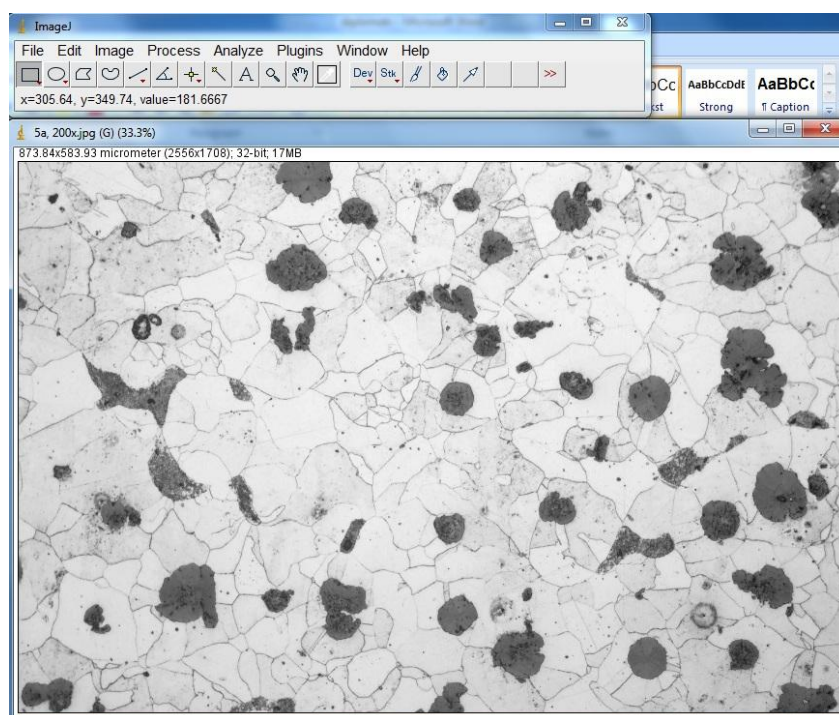
Slika 49. Kalibriranje slike, odnosno unošenje mjerila

2. Zatim se pomoću opcije CROP uzima čistu sliku bez mjerila koja se želi analizirati. Na slici 50 prikazano je korištenje opcije CROP.



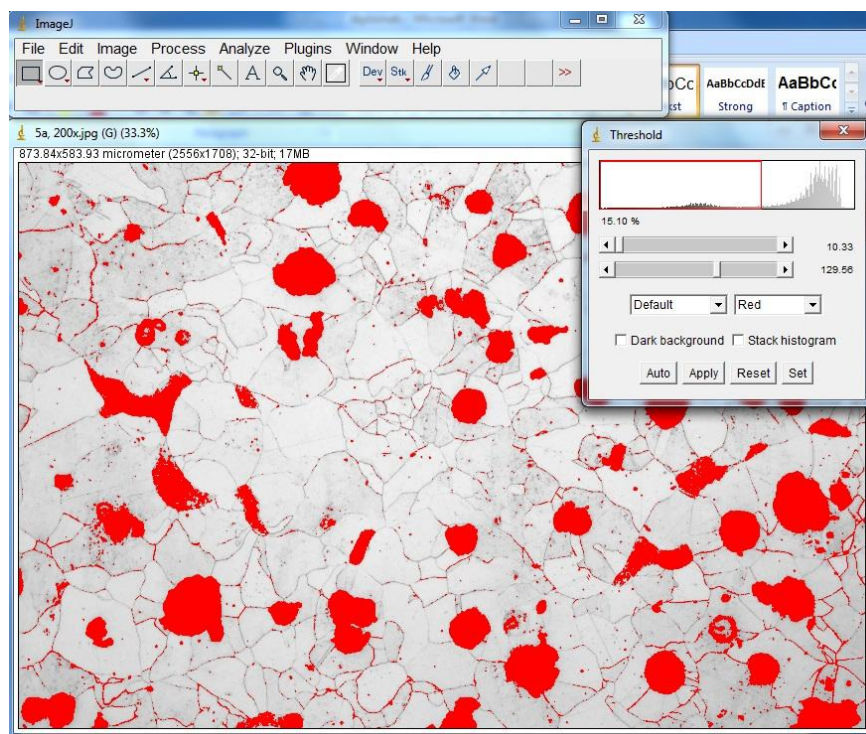
Slika 50. Korištenje opcije CROP

3. Potrebno je i prebaciti sliku u 32-bita. Slika 51 prikazuje 32 – bitnu sliku.



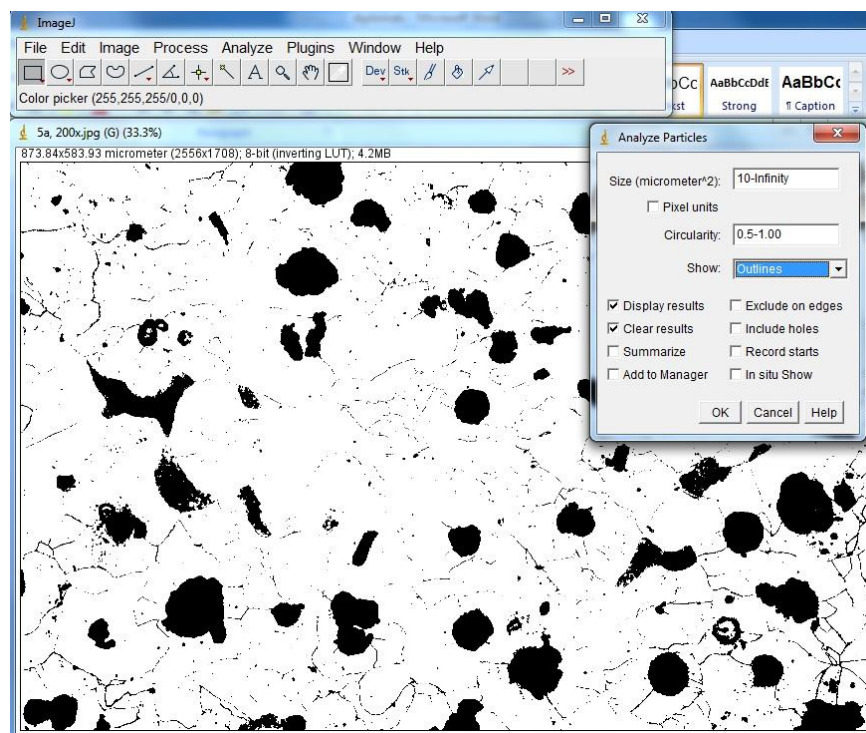
Slika 51. Tip slike 32 – bit

4. Koristi se opcija TRESHOLD kako bi se označilo željeno područje. Slika 52 prikazuje korištenje opcije TRESHOLD.



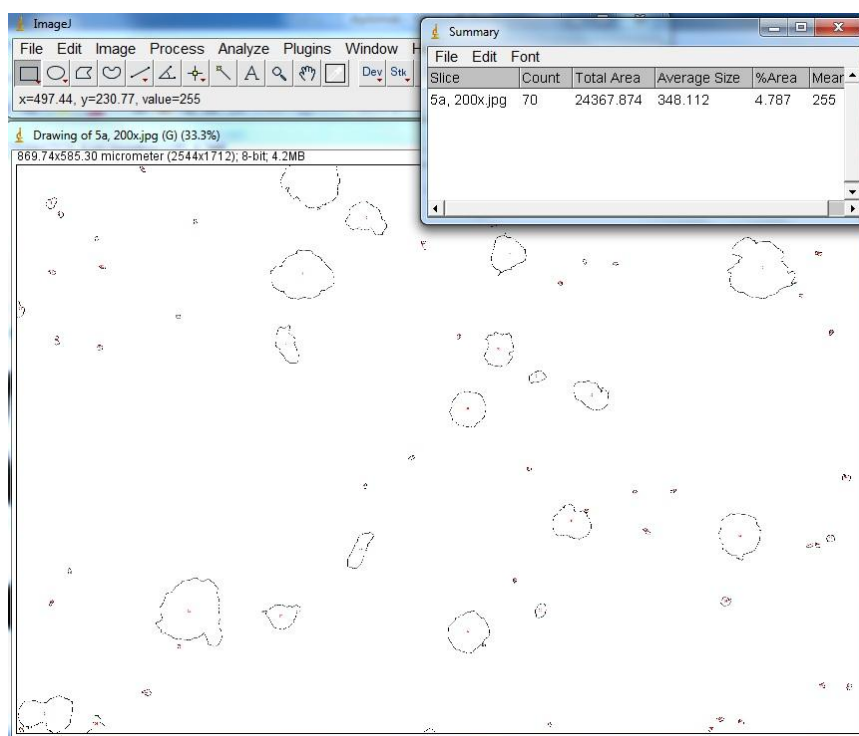
Slika 52. Opcija threshold

5. Zatim se analizira pojedine objekte. Slika 53 prikazuje analizu mikrostrukture.



Slika 53. Analiza mikrostrukture

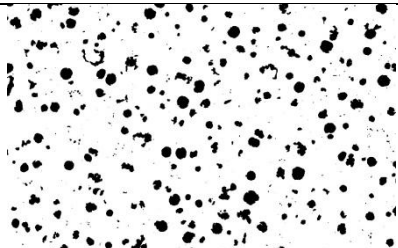
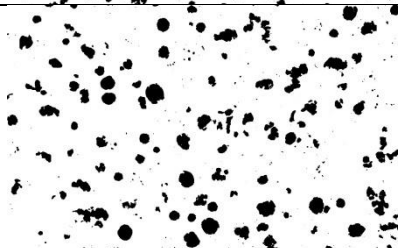

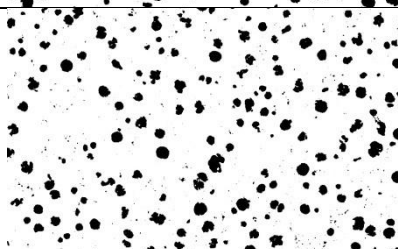


6. Otvori se prozor koji pokazuje zastupljenost prethodno označenog grafita. Na slici 54 je prikazana zastupljenost grafita.



Slika 54. Prikaz udjela grafita

Tablica 12 prikazuje mjesta na kojima je izmjeren udio grafita.

Tablica 12. Prikaz udjela grafita u mikrostrukturi

Oznaka	Debljina, mm	Mikrostruktura	Grafit, %
Viši CE	25		11,11
	50		10,78
	75		10,89
Niži CE	25		11,26
	50		11,89
	75		11,29

Udio grafita kreće se u rasponu od 10,78 – 11,89 %, što odgovara ispitivanoj vrsti nodularnog lijeva. Razlika u udjela grafita kod višeg i nižeg CE je zanemariva.

4.6. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava

Dobiveni rezultati mehaničkog ispitivanja prikazani su u tablici 13.

Tablica 13. Prikaz mehaničkih svojstava ispitivanih odljevaka

	Oznaka	Debljina stijenke, mm	R_m , N/mm ²	$R_{p0,2}$, N/mm ²	A5, %	HB, N/mm ²
VIŠI CE	Y - 75	75	443	318	20	146
	Y - 50	50	442	318	13	149
	Y - 25	25	473	338	17	152
NIŽI CE	Y - 75	75	417	287	21	137
	Y - 50	50	422	293	19	137
	Y - 25	25	464	331	20	143

Uspoređujući rezultate ispitivanja s normom HR EN 1563:2011 vidi se da svi odljevci pripadaju materijalu GJS 400 – 15.

Kod većih debljina stijenke vidljiv je pad čvrstoće i granice razvlačenja. Rezultati su prilično ujednačeni što se tiče istezljivosti i tvrdoće.

Y – proba debljine stijenke 50 mm višeg CE odstupa svojim rezultatom za istezljivost.

5. ZAKLJUČAK

Nodularni lijev je vrsta željeznog lijeva kod kojeg je ugljik izlučen u obliku grafitnih nodula. Upravo zbog specifičnog (nodularnog, kugličastog) oblika grafita ima povoljnu kombinaciju svojstava. Karakterizira ga visoko istezanje, visoka granica razvlačenja (u odnosu na sivi lijev), dobra žilavost, livljivost i strojna obradivost, dok je vlačna čvrstoća na razini vrijednosti vlačne čvrstoće čeličnog lijeva.

U radu je provedeno metalografsko ispitivanje te ispitivanje mehaničkih svojstava nodularnog lijeva kvalitete EN GJS 400 -15 obzirom na različitu debljinu stijenke te različiti CE.

Ispitivanjem mikrostrukture pokazalo se da debljina stijenke utječe na broj i veličinu nodula. Povećanjem debljine stijenke smanjuje se broj nodula ali nodule postaju veće. Isto tako, vidljivo je da je došlo i do degeneracije grafita na svim uzorcima Y – proba.

Gledajući rezultate mehaničkih ispitivanja pokazalo se da će s povećanjem debljine stijenke doći do smanjenja vlačne čvrstoće i granice razvlačenja. Tvrdća te istezljivost se neznatno promijenila obzirom na debljinu stijenke.

Udio grafita na svim uzorcima Y – proba u nenagrizenom stanju pri povećanju od 100 puta kreće se od 10,78% do 11,89%. Razlika u udjelu grafita kod višeg i nižeg CE je zanemariva.

6. LITERATURA

- [1] Unkić, F., Glavaš, Z.: Osnove lijevanja metala, Zbirka riješenih zadataka, Sisak, 2009.
- [2] Unkić, F., Glavaš, Z.: Lijevanje željeznih metala, Sveučilište u Zagrebu - Metalurški fakultet, Sisak, 2008.
- [3] dostupno na <http://foundry-sag.com/products/ductile-iron-castings>
- [4] ..., HRN EN 1563:2011 – Hrvatska norma: Ljevarstvo – Nodularni ljevovi.
- [5] ..., HRN EN ISO 945:2009 – Hrvatska norma: Željezni ljev – Označivanje mikrostrukture grafita.
- [6] John R. Brown: Foseco Ferrous Foundryman's Handbook, 2000. godina
- [7] Bonačić Mandinić, Z.; Budić, I.; Osnove tehnologije kalupljenja, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod 2001.
- [8] R. Elliot, Cast Iron Technology, Department of Metallurgy and Materials Science, University of Manchester, England; 1988.
- [9] dostupno na <http://hapli.wordpress.com/forum-ferro/besi-cor/>
- [10] Ljevački priručnik, Savez ljevača Hrvatske, Zagreb, 1985
- [11] F. Unkić, N. Gavranović, M. Vasilić, Influence of Silicon content on the Mechanical Properties of As-cast and Heat Treated Samples of Nodular iron Grade EN-1563-GJS-400-18-LT, Strojstvo 47(2005), 1-2, 33-38.
- [12] M. Gagné, The Sorelmetal Book of Ductile Iron, Rio Tinto Iron & Titanium, Montreal, Kanada, 2004
- [13] Metals handbook, Ninth edition, Vol. 15, Casting, ASM International, Metals Park, Ohio, SAD, 1988.
- [14] L. Karbić, Metode proizvodnje žilavog lijeva, Ljevaonica i tvornica armatura Varaždin, Varaždin, 1973.

[15] ASTM A439 - 83(2004) Standard Specification for Austenitic Ductile Iron Castings.

[16] Nodular Iron, <http://www.metallography.com/technotes/iron/nodular.htm>

[17] Časopis Ljevarstvo br. 2/2008

[18] B. Bauer, I. Mihalic, Osnove tehnologije lijevanja, Zagreb 2012.

PRILOZI

I. CD – R disc